



**MANUEL FILIPE DE  
CARVALHO ALVES  
PINHEIRO**

**COMPÓSITOS AVANÇADOS REFORÇADOS COM  
FIBRAS NATURAIS PARA CONSTRUÇÃO**



**MANUEL FILIPE DE  
CARVALHO ALVES  
PINHEIRO**

**COMPÓSITOS AVANÇADOS REFORÇADOS COM  
FIBRAS NATURAIS PARA CONSTRUÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Dr. Francisco Queirós de Melo, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



## **o júri**

presidente

**Prof. Dr. Filipe Teixeira Dias**  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. António Torres Marques**  
professor catedrático da faculdade de engenharia da Universidade do Porto

**Prof. Dr. Francisco Queirós de Melo**  
professor associado da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. Helena Maria Galha Bártolo**  
professor adjunta do Instituto Politécnico de Leiria

## **agradecimentos**

Em primeiro lugar agradecer aos meus pais que ao longo da minha vida me tem ajudado, incentivado e apoiado em todos os momentos, bom e maus e pela sua contribuição para a minha formação profissional e sobretudo pessoal.

À minha namorada pela sua compreensão e apoio durante estes anos e sobretudo durante a realização desta tese.

A todos os meus familiares que sempre me apoiaram. A todos eles o meu muito obrigado.

À Doutora Helena Bártolo e ao Doutor Carlos Capela, por toda ajuda na realização da tese e por todo o apoio prestado.

Ao Eng.<sup>o</sup> Abílio Silva, Eng.<sup>o</sup> Carneira e à Eng.<sup>a</sup> Cláudia Neto a ajuda e disponibilidade demonstrada na realização dos ensaios de difracção raio-X, nos laboratórios de SECIL no Outão.

À Doutora Ausenda Mendes e à Eng.<sup>a</sup> Katia pela ajuda prestada na realização das soluções utilizadas para o tratamento das fibras.

A todos os meus colegas de curso e em especial ao grande amigo Gil Pinheiro por toda a ajuda e pelas excelentes ideias dadas nas alturas certas.

Aos que pela pressa não foram citados as minha sinceras desculpas e os meus sinceros agradecimentos.

## **palavras-chave**

materiais compósitos, fibra natural, fibra de madeira, resina epoxídica

A utilização de fibras naturais para reforço de compósitos poliméricos tem despertado grande interesse como substituto das fibras sintéticas, com vantagens em termos ambientais e económicos.

Este trabalho investiga a utilização de fibras de pinho e faia como agentes de reforço na preparação de compósitos de matriz epoxídica. Procedeu-se à optimização dos principais parâmetros envolvidos no processo de preparação destes materiais, como a definição do tipo de molde a utilizar, forma de aplicação da pressão, método de mistura da matriz/fibras e comprimento (granulometria) das fibras de madeira a utilizar como agente de reforço. As fibras de madeira foram em seguida submetidas a um tratamento químico, com a aplicação de uma solução aquosa de hidróxido de sódio 10% com a finalidade de intensificar as interações na interface fibra-matriz, melhorando assim a adesão da matriz à fibra e diminuindo a absorção de água por parte das fibras de madeira. Finalmente foram realizados ensaios para determinação de densidades, ensaios de flexão, difracção de raio-X e ensaios de absorção de água aos provetes obtidos.

Os resultados obtidos indicam que o tratamento aplicado às fibras diminui a capacidade de absorção de água. A maior adesão da matriz à fibra, associada à redução do carácter hidrofílico destas fibras, permitiu um melhor desempenho dos compósitos obtidos com fibras tratadas sendo este resultado mais evidente nos compósitos que contem fibras de pinho. Relativamente às propriedades mecânicas, verifica-se que o tratamento em alguns casos degrada a resistência mecânica.

**keywords**

composite materials, natural fiber, wood fiber, epoxy resin

**abstract**

The use of composite materials reinforced with natural fibers has been grabbing increasing attention to substitute synthetic fibers, as they add value in environmental and economic terms.

This research work investigates pinewood and beechwood as reinforces for composites with an epoxy-based matrix. Firstly, the optimization of the process main parameters was carried out to define which mould type to use, how to apply pressure, a proper method to assemble matrix and fibers, and the more suitable wood fiber length (granulometry) to reinforce the epoxy resin. Wood fibers were then submitted to a chemical treatment through the application of a 10% aqueous sodium hydroxide, to improve the cohesion in the interfacial transition zone between woodfiber and matrix. Finally, some bending and water absorption tests were carried out to determine specimen mechanical characteristics.

The treatment applied to fibers apparently reduces composite ability to absorb water. A better fiber/matrix cohesion associated with a reduced hydrophilic fiber characteristic enables a better performance of these composites. This feature is more perceptible in pinewood fiber composites. Apparently, the chemical treatment induces an higher degradability than expected in some cases.

# Índice

Lista de Figuras .....	<b>3</b>
Lista de Tabelas .....	<b>6</b>
1. Introdução.....	<b>9</b>
2. Materiais Compósitos e Processos .....	<b>13</b>
2.1 <i>Caracterização de Materiais</i> .....	<b>16</b>
2.1.1 Fibras.....	16
2.1.1.1 Fibras de Vidro.....	16
2.1.1.2 Fibras de Carbono .....	19
2.1.1.3 Fibras de Aramida.....	21
2.1.1.4 Fibras Naturais .....	22
2.1.2 Resinas .....	33
2.1.2.1 Resinas de Poliéster .....	35
2.1.2.2 Resinas Epoxidicas.....	38
2.1.2.3 Resinas Estervinilicas.....	41
2.1.2.4 Resinas Fenólicas.....	42
2.2 <i>Compósitos Matriz Polimérica</i> .....	<b>46</b>
2.3 <i>Fibras de Madeira para Reforço de Compósitos poliméricos</i> .....	<b>50</b>
2.4 <i>Interface Fibra-Matriz</i> .....	<b>53</b>
2.5 <i>Materiais compósitos reforçados com fibras naturais utilizados na construção</i> .....	<b>58</b>
2.5.1 MDF .....	59
2.5.2 Contraplacados .....	60
2.5.3 Aglomerados / MDP / OSB.....	61
2.5.4 Painéis Cimento / Fibras de Madeira .....	62
2.5.4.1 Viroc®.....	63
2.5.4.2 Icowallpanel®.....	65
2.6 <i>Métodos de Processamento</i> .....	<b>65</b>
2.6.1 Fabricação por Compactação .....	66
3. Materiais, Técnicas e Procedimentos Experimentais .....	<b>69</b>
3.1 <i>Materiais</i> .....	<b>69</b>
3.1.1 Fibras.....	69
3.1.2 Resina e Catalisador.....	69
3.2 <i>Técnicas e Procedimentos Experimentais</i> .....	<b>70</b>
3.2.1 Preparação das Fibras .....	70
3.2.2 Preparação da Matriz Termoendurecível Epoxidica.....	71
3.2.3 Processamento dos materiais compósitos.....	71
3.3 <i>Tratamentos das Fibras</i> .....	<b>75</b>
3.4 <i>Caracterização das Fibras</i> .....	<b>75</b>
3.4.1 Composição Química.....	76
3.4.2 Determinação do teor de Humidade.....	76



3.4.3 Determinação do teor de Cinzas.....	77
3.4.4 Difracção de Raio – X .....	77
<b>3.5 Caracterização dos Compósitos.....</b>	<b>79</b>
3.5.1 Ensaio de Flexão.....	79
3.5.2 Absorção de Água .....	80
3.5.3 Determinação da Densidade.....	84
<b>4. Resultados Experimentais.....</b>	<b>87</b>
4.1 Determinação da Quantidade de Humidade, Cinzas e Elementos Químicos.....	87
4.2 Difracção de Raio – X .....	88
4.3 Ensaio de Caracterização Mecânica em Flexão.....	93
4.3.1 Influência do Tipo de Fibra no Comportamento Mecânico dos Materiais Processados.....	94
4.3.2 Influência da Pressão no Processamento de Materiais Compósitos com Fibra de Pinho e Faia.....	104
4.3.3 Influência da Granulometria nas Propriedades Mecânicas dos Materiais Compósitos Processados com Fibras Naturais.....	108
4.3.4 Influência do Tipo de Tratamento nas Propriedades Mecânicas dos Materiais Compósitos Processados com Fibras Naturais.....	111
4.4 Avaliação das Densidades dos Materiais Compósitos Processados com Fibras Naturais.....	114
4.5 Ensaios de Absorção de Água dos Materiais Processados.....	115
4.5.1 Influência da Absorção de Água nos Dois Tipos de Fibra Considerados no Processamento dos Compósitos .....	115
4.5.2 Influência do Tipo de Tratamento na Absorção de Água no Processamento dos Compósitos .....	116
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>119</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>123</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Sistema de Classificação de Materiais Compósitos .....	15
Figura 2. Classificação de Materiais Compósitos, relativamente ao tipo de matriz.....	15
Figura 3. Estrutura química da fibra de carbono.....	19
Figura 4. Estrutura química da fibra de aramida .....	21
Figura 5. Classificação das fibras naturais de acordo com a sua origem.....	22
Figura 6. Estrutura das fibras naturais .....	24
Figura 7. Estrutura química da celulose (Monómero) .....	27
Figura 8. Microestrutura de um bloco de madeira macia (Ampliação 75 x).....	29
Figura 9. Microestrutura de um bloco de madeira dura (Ampliação 75 x) .....	31
Figura 10. Estrutura química da resina de poliéster.....	36
Figura 11. Estrutura química do monómero da resina epoxidica .....	39
Figura 12. Estrutura química da resina estervinilica.....	41
Figura 13. Estrutura química da resina fenólica .....	43
Figura 14. Características dos plásticos reforçados com fibras de madeira.....	51
Figura 15. Alterações na superfície da fibra provocadas pelos diversos tratamentos.....	55
Figura 16. Classificação dos compósitos com madeira, por granulometria, densidade e processo de fabrico (Suchsland and Wooson 1986) .....	58
Figura 17. Painéis de MDF utilizados na indústria .....	59
Figura 18. Exemplos da aplicação de painéis contraplacados .....	61
Figura 19. Exemplos de painéis OSB, MDP e aglomerados utilizados na construção .....	62
Figura 20. Pannel de Viroc® .....	64
Figura 21. Secção de um pannel Icowallpanel®.....	65
Figura 22. Granulado para a obtenção de peças com injeção de termoplásticos.....	66
Figura 23. Esquema de fabrico de peças por compactação a frio .....	67
Figura 24. Esquema de fabrico de peças por compactação a quente (Riedle, 1999) .....	68
Figura 25. Aspecto inicial das fibras obtidas para a realização dos provetes .....	70
Figura 26. Fibras após operação de separação .....	71
Figura 27. Sistema de mistura utilizado para a obtenção do compósito.....	72

Figura 28. Molde e sistema de compactação utilizado .....	72
Figura 29. Placas obtidas através da compactação a frio .....	73
Figura 30. Provetes obtidos para a realização do ensaio de flexão .....	74
Figura 31. Tratamentos das fibras de faia e pinho com solução aquosa de hidróxido de sódio 10% .....	75
Figura 32. Esquema do ensaio de flexão utilizado .....	80
Figura 33. Ensaio de flexão dos provetes .....	80
Figura 34. Determinação da densidade dos compósitos obtidos .....	85
Figura 35. Difraccção de Raio – X para a fibra de faia .....	89
Figura 36. Difraccção de Raio – X para a fibra de faia .....	89
Figura 37. Difraccção de Raio – X para a fibra de pinho sem tratamento .....	90
Figura 38. Difraccção de Raio – X para a fibra de pinho sem tratamento .....	91
Figura 39. Difraccção de Raio – X para a fibra de pinho tratadas com solução aquosa de hidróxido de sódio 10% .....	92
Figura 40. Difraccção de Raio – X para a fibra de pinho tratadas com solução aquosa de hidróxido de sódio 10% .....	92
Figura 41. Curva típica do ensaio de flexão em três pontos .....	94
Figura 42. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras, com uma granulometria de 1.4 mm e pressão de fecho do molde de 0.6 MN/m <sup>2</sup> .....	96
Figura 43. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras, com uma granulometria de 1.4 mm e pressão de fecho do molde de 0.3 MN/m <sup>2</sup> .....	97
Figura 44. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras, com uma granulometria de 1.0 mm e pressão de fecho do molde de 0.6 MN/m <sup>2</sup> .....	98
Figura 45. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras, com uma granulometria de 1.0 mm e pressão de fecho do molde de 0.3 MN/m <sup>2</sup> .....	99
Figura 46. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras com tratamento, com uma granulometria de 1.4 mm e pressão de fecho do molde de 0.6 MN/m <sup>2</sup> .....	101
Figura 47. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras com tratamento, com uma granulometria de 1.4 mm e pressão de fecho do molde de 0.3 MN/m <sup>2</sup> .....	102
Figura 48. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras com tratamento, com uma granulometria de 1.0 mm e pressão de fecho do molde de 0.6 MN/m <sup>2</sup> .....	103
Figura 49. Gráficos da tensão máxima e do módulo para os provetes obtidos com fibra de pinho com diferentes pressões de processamento .....	105

---

Figura 50. Gráficos da tensão máxima e do módulo para os provetes obtidos com fibra de faia com diferentes pressões de processamento .....	106
Figura 51. Gráficos da tensão máxima e do módulo para os provetes obtidos com fibras de pinho tratadas, com diferentes pressões de processamento .....	107
Figura 52. Gráficos da tensão máxima e do módulo para os provetes obtidos com fibra de faia tratada, com diferentes pressões de processamento .....	108
Figura 53. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de pinho com diferentes granulometrias.....	109
Figura 54. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de pinho tratada, com diferentes granulometrias..	110
Figura 55. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de faia tratada, com diferentes granulometrias.....	111
Figura 56. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de pinho com tratamento e sem tratamento .....	112
Figura 57. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de faia com tratamento e sem tratamento .....	113
Figura 58. Gráficos de absorção de água para as fibras de faia e pinho .....	116
Figura 59. Gráficos de absorção de água para as fibras de faia e pinho com tratamento e sem tratamento .....	117

---

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Composição do vidro tipo E (eléctrico) utilizado para a fabricação da manta de fibras de vidro.....	16
Tabela 2. Comparação da composição química dos diferentes tipos de fibras de vidro.....	18
Tabela 3. Comparação entre diferentes tipos de fibras de carbono.....	19
Tabela 4. Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais.....	22
Tabela 5. Propriedade da estrutura das fibras naturais.....	24
Tabela 6. – Propriedades de alguns tipos de fibras naturais usados no fabrico de materiais compósitos.....	26
Tabela 7. Propriedades da madeira de Faia.....	31
Tabela 8. Propriedades da madeira de Pinho.....	32
Tabela 9. Propriedades de alguns compósitos com resina fenólica.....	45
Tabela 10. Comparação entre um termoplástico e um compósito de matriz termoendurecível reforçado com fibras naturais.....	48
Tabela 11. Comparação da resistência ao impacto de vários compósitos reforçados com fibras naturais.....	56
Tabela 12. Comparação de diferentes tratamentos aplicados às fibras naturais.....	56
Tabela 13. Propriedades das fibras de faia utilizadas.....	88
Tabela 14. Propriedades das fibras de pinho utilizadas.....	88
Tabela 15. Propriedades das fibras de pinho tratadas.....	89
Tabela 16. Índice de cristalinidade das fibras de faia.....	89
Tabela 17. Índice de cristalinidade das fibras de pinho.....	91
Tabela 18. Índice de cristalinidade das fibras de pinho tratadas.....	92
Tabela 19. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de pinho e faia sem tratamento com uma granulometria de 1.4 e 0.6 MN/m <sup>2</sup> de pressão de compactação.....	96

---

Tabela 20. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de pinho e faia sem tratamento com uma granulometria de 1.4 e 0.3 MN/m <sup>2</sup> de pressão de compactação.....	97
Tabela 21. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de pinho e faia sem tratamento com uma granulometria de 1.0 e 0.6 MN/m <sup>2</sup> de pressão de compactação.....	99
Tabela 22. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de pinho e faia sem tratamento com uma granulometria de 1.0 e 0.3 MN/m <sup>2</sup> de pressão de compactação.....	100
Tabela 23. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de pinho e faia com tratamento com uma granulometria de 1.4 e 0.6 MN/m <sup>2</sup> de pressão de compactação.....	102
Tabela 24. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de pinho e faia com tratamento com uma granulometria de 1.4 e 0.3 MN/m <sup>2</sup> de pressão de compactação.....	103
Tabela 25. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de pinho e faia com tratamento com uma granulometria de 1.0 e 0.6 MN/m <sup>2</sup> de pressão de compactação.....	104
Tabela 26. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de pinho e faia sem tratamento com uma granulometria de 1.0 e 0.3 MN/m <sup>2</sup> de pressão de compactação.....	116



## 1. Introdução

Desde os tempos mais remotos, que a humanidade tem procurado desenvolver novos materiais, em parte para facilitar as suas tarefas e aumentar o seu bem-estar. As necessidades das sociedades modernas obrigam a um crescente e constante desenvolvimento tecnológico.

À medida que as tecnologias evoluem, torna-se mais difícil satisfazer plenamente as necessidades com os materiais disponíveis, quer seja por questões de propriedades mecânicas, características, forma de obtenção ou custo. O desenvolvimento das sociedades modernas e do ser humano está intimamente ligado ao desenvolvimento de novos materiais.

Por outro lado, houve um aumento descontrolado na procura e no uso das reservas naturais, o que tem trazido consequências nefastas ao planeta. As alterações climáticas ou o aquecimento global, o desequilíbrio dos ecossistemas e os desastres ambientais têm despertado um grande interesse na comunidade científica e na sociedade em geral, onde os efeitos locais, regionais e globais são associados à utilização excessiva dos recursos naturais (Marinelli, 2008).

Hoje em dia, ao serem desenvolvidos novos materiais tenta-se utilizar recursos provenientes de fontes renováveis e amigas do ambiente, de modo a reduzir o impacto ambiental e os custos de produção. A possibilidade de reciclagem e de biodegradabilidade são factores importantes no planeamento, desenvolvimento e aplicação de novos materiais.

As normas ambientais cada vez mais exigentes, bem como o aumento do preço do petróleo, têm provocado uma mudança no desenvolvimento industrial no sentido de desenvolver processos e produtos mais compatíveis com o meio ambiente (Bogoeva-Gaceva *et al*, 2006).



Actualmente o mercado da construção, está em larga expansão, na procura de materiais alternativos, com melhores performances, quer a nível de propriedades mecânicas, acústicas, térmicas e económicas. Neste contexto as fibras vegetais, também chamadas fibras naturais ou lignocelulósicas, são cada vez mais uma importante alternativa para utilização como material de reforço de matrizes poliméricas, em substituição das tradicionais fibras sintéticas. Como principais vantagens das fibras naturais relativamente às fibras sintéticas, pode-se referir:

- Baixa densidade;
- Alta deformabilidade;
- Baixa abrasividade aos moldes e aos equipamentos;
- Baixo custo;
- Produto derivado de recursos renováveis;
- Não tóxicas;
- Elevado alongamento e módulo específico;

Contudo as fibras naturais apresentam algumas desvantagens quando comparadas com as fibras sintéticas, tais como:

- Baixa temperatura de processamento, devido à degradação da celulose;
- Incompatibilidade entre as fibras, que são hidrofílicas e o as matrizes poliméricas que são hidrofóbicas;
- Elevada absorção de água;
- Heterogeneidade na estrutura e na composição química;
- Restrições quanto às condições de processamento;
- Devido ao alto teor de polissacarídeos (hemicelulose e celulose) apresentam alta higroscopicidade (Paiva *et al*, 1999; Tajvidi *et al*, 2003).

Pretende-se com este trabalho efectuar o estudo de materiais compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras naturais, para

aplicações em engenharia. O presente trabalho está inserido num projecto que visa a valorização tanto das fibras naturais, como da lignina e celulose que são um subproduto destas fibras, que num futuro muito próximo poderão ser uma alternativa muito viável às fibras sintéticas. Como principais objectivos deste trabalho pode-se referir:

- Produzir materiais compósitos poliméricos, reforçados com fibras naturais, mais concretamente fibras de madeira de faia e de pinho, com e sem tratamento;
- Estudar o interface fibra/matriz de modo a melhorar a adesão da fibra à matriz;
- Efectuar tratamentos nas fibras de modo a aumentar a resistência mecânica do compósito;
- Realizar ensaios de flexão e de absorção de água de forma a caracterizar os compósitos processados;
- Caracterizar a morfologia e as modificações das fibras naturais e dos compósitos, através da técnica de Difracção de Raio – X;
- Aproveitamento económico da matéria-prima (Resíduos) sem mercado e de baixo custo;
- Aplicação coerente e directa destes materiais na indústria;

No que se refere a Portugal, as fibras naturais existentes em maior escala, como matéria-prima e como resíduo, são as fibras de madeira. Um material deixa de ser resíduo pela sua valorização como matéria-prima, quando se produzem novos produtos, e neste caso o resíduo passa a ser tratado como um subproduto do processo produtivo (Júnior e Pimentel, 2000).

Das várias classes e tipos de madeira existentes no nosso país, foram seleccionadas para a realização deste trabalho as fibras de pinho e as

fibras de faia, dado pertencerem a diferentes classes de madeira. Pretende-se analisar qual a influência desta variável no produto final.

A resina seleccionada foi a resina epoxy devido às suas excelentes propriedades mecânicas e à sua facilidade de processamento.

A primeira etapa do trabalho foi dedicada à optimização do processo de obtenção dos compósitos. Em seguida procedeu-se ao estudo de parâmetros do processo, tais como: tipo de resina a utilizar, tipo de molde, processo de moldagem (pressão de processamento) e fracção volúmica de resina. Após determinados todos os parâmetros, procedeu-se à caracterização e ao tratamento das fibras utilizadas, de modo a aumentar a compatibilidade entre as fibras e a matriz.

Numa terceira fase foram processados os compósitos utilizando fibras com e sem tratamento para posterior caracterização através de ensaios de flexão e absorção de água. Por último, procedeu-se ao tratamento e análise dos dados obtidos, através do ensaio de flexão e absorção de água.

## 2. Materiais Compósitos e Processos

A palavra compósito deriva da palavra composto, ou seja, qualquer coisa formada por partes (ou constituintes) diferentes. Um compósito pode ser definido como uma mistura de dois ou mais materiais constituintes distintos ou de fases distintas.

A importância dos compósitos em engenharia deriva do facto de que, ao combinar-se dois ou mais materiais diferentes, pode-se obter um material cujas propriedades são superiores em alguns aspectos, comparativamente às propriedades de cada um dos componentes considerados isoladamente (Joshi *et al*, 2003).

Os compósitos têm duas ou mais fases distintas, separadas por uma interface, sendo fundamental a especificação destes constituintes. O constituinte que é contínuo e está frequentemente, mas nem sempre, presente em maior quantidade é denominado de matriz. As propriedades da matriz são melhoradas pela incorporação de um outro constituinte, ou agente de reforço, de modo a produzir o compósito. Esse outro constituinte é citado como uma fase de reforço, que actua aprimorando as propriedades mecânicas da matriz (Mueller, 2004).

À escala atómica, algumas ligas metálicas e alguns materiais poliméricos também podem ser considerados materiais compósitos, uma vez que são formados por agrupamentos atómicos diferentes (Nordin, 2004) .

De uma forma bastante abrangente pode dizer-se que os compósitos constituem uma classe de materiais heterogêneos, multifásicos, podendo ser ou não poliméricos, em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço (componente estrutural), e o outro,

contínuo, é o meio de transferência desse esforço (componente matricial) (Hull, 1982).

A matriz dos compósitos pode ser um polímero, um metal ou mesmo um material cerâmico (figuras 1 e 2). Uma classe de compósitos particularmente interessantes e que tem encontrado inúmeras aplicações no mercado são os compósitos de matriz polimérica. O polímero constitui a fase contínua, podendo ser termoplástico ou termoendurecível.

A escolha da matriz polimérica dependerá das propriedades físicas, mecânicas e térmicas exigidas para uma determinada aplicação, como também do processo de fabricação escolhido e do custo associado. A matriz tem o papel de manter a integridade estrutural do compósito através da ligação simultânea com a fase dispersa, em virtude de suas características coesivas e adesivas. Outra das funções igualmente exigida à matriz é a de transferir o esforço para a fase dispersa e protegê-la contra o ataque do meio ambiente. A geometria da fase descontínua é um dos principais parâmetros a considerar, visto que as propriedades mecânicas destes materiais dependem da forma e das dimensões do reforço (Mueller, 2004).

Os compósitos preparados no presente trabalho podem ser classificados como, compósitos reforçados com fibras, de camada única, com fibras descontínuas e com uma orientação aleatória.

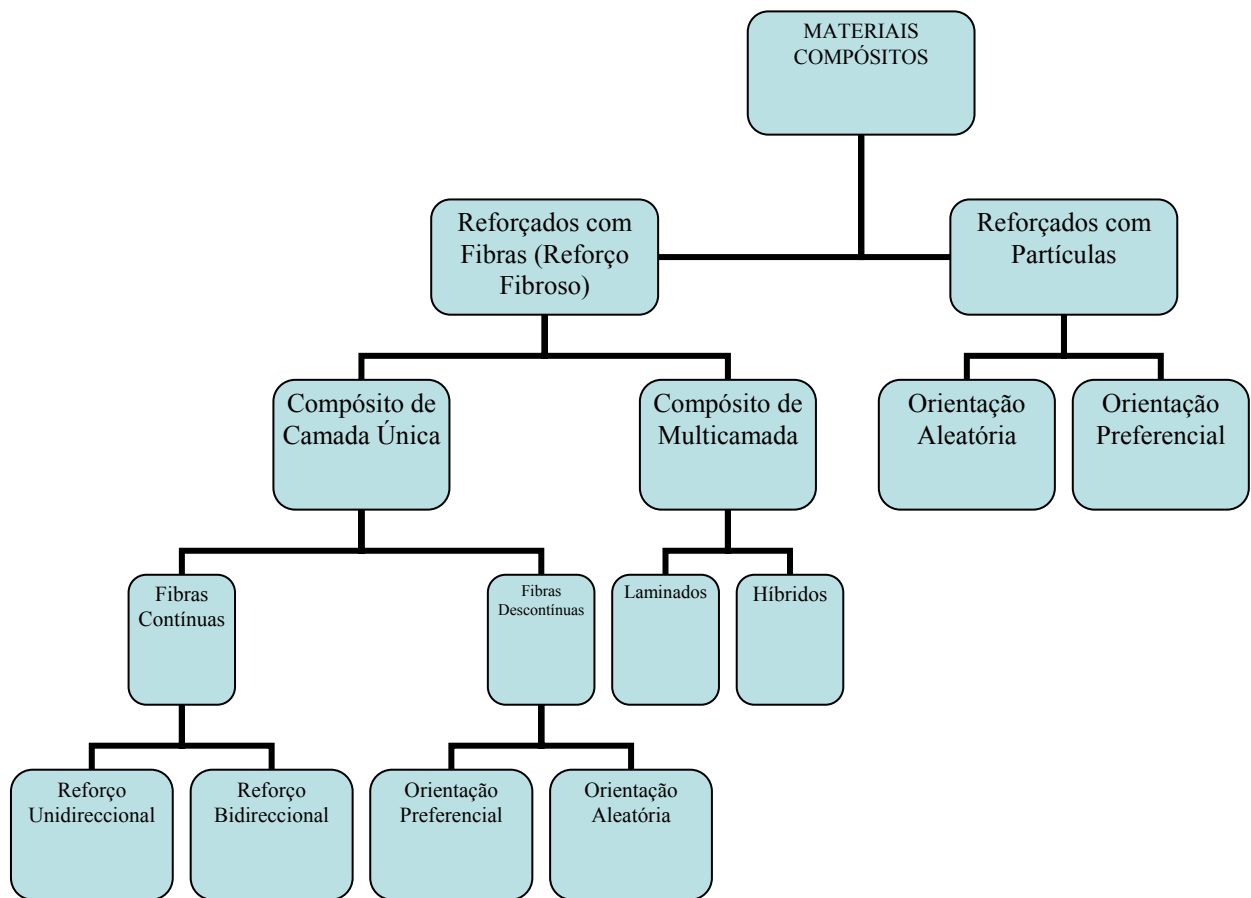


Figura 1. Sistema de Classificação de Materiais Compósitos

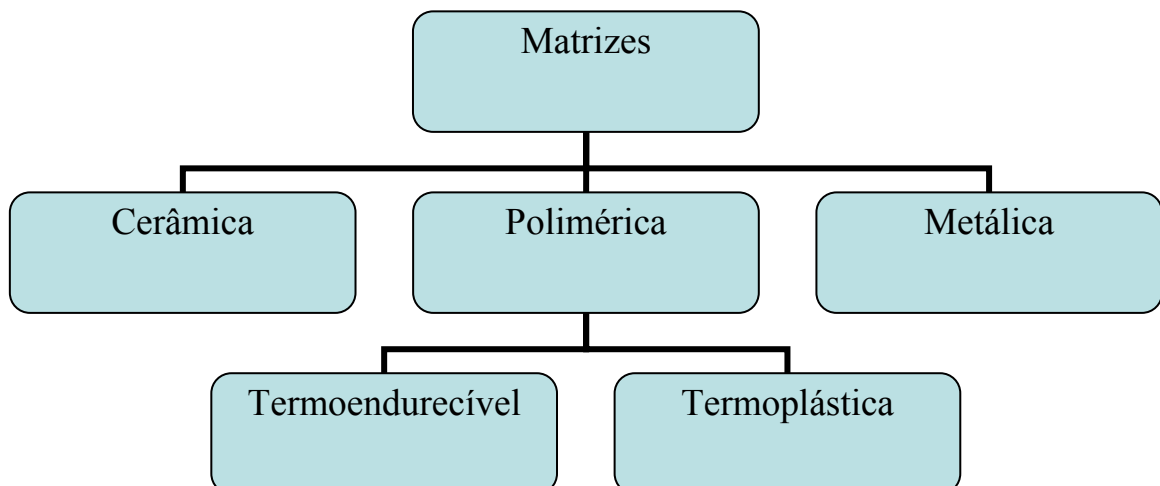


Figura 2. Classificação de Materiais Compósitos, relativamente ao tipo de matriz

## 2.1 Caracterização de Materiais

### 2.1.1 Fibras

As fibras, são materiais produzidos na forma de filamentos, isto é com uma das dimensões muito superior às outras duas.

As fibras apresentam como característica fundamental uma elevada resistência tênsil. Isto significa que são necessárias tensões muito elevadas para que exibam deformações significativas, o que se deve ao alinhamento das macro moléculas numa direcção paralela ao eixo da fibra (Clemons, 2008; Pouzada e Bernardo, 1983 ).

#### 2.1.1.1 Fibras de Vidro

Material vítreo são aqueles materiais líquidos, que durante o arrefecimento, solidificam organizando-se em unidades ou retículos cristalinos. A orientação e a organização regular dessas unidades básicas são dificultadas pela alta viscosidade e conseqüentemente a imobilidade dos átomos constituintes dos vidros fundidos, durante o arrefecimento.

As fibras de vidro, utilizadas como agente de reforço em matrizes poliméricas, possuem uma formulação especial - sílica como constituinte principal, boro (Bo) como agente fluidizante e óxidos modificadores, agindo como Al e Ca. A classificação para esse vidro é alumínio-boro silicato. É conhecido também como vidro do tipo E, o qual possui excelentes propriedades eléctricas (tabela 1). O vidro, sob a forma fibrosa, possui alta resistência à tracção (Nicolai, 2007).

Tabela 1. Composição do vidro tipo E (elétrico) utilizado para a fabricação da manta de fibras de vidro.

Componentes químicos do vidro tipo E	%
SiO <sub>2</sub>	52,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,4
CaO	17,2
MgO	4,6
Na <sub>2</sub> O	0,8
Bo <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,6

O material compósito reforçado com fibra de vidro (PRFV) possui uma ótima estabilidade dimensional devido à sua natureza hidrofóbica. As fibras de vidro possuem melhores propriedades mecânicas do que as fibras naturais, por isso, na utilização da fibra natural como agente de reforço em materiais compósitos, a fração volumétrica será maior do que a utilizada com a fibra de vidro. Este alto grau de fração volumétrica reduz a densidade e o peso da matriz polimérica utilizada do material compósito (Joshi *et al*, 2003).

As fibras de vidro são produzidas a partir do vidro na forma líquida, que é arrefecido a alta velocidade. Através do controlo de temperatura e velocidade de escoamento do vidro são produzidos vários tipos de filamentos com diâmetros variados. Os filamentos de diâmetro contínuo são tratados para melhorar a sua adesão, resistência à abrasão e absorção de humidade.

As fibras de vidro são produzidas com uma variedade de composições químicas, cada uma delas exibindo diferentes propriedades mecânicas e químicas e designadas por uma letra do alfabeto. De toda essa variedade, as fibras de vidro do tipo E, C e S são as mais utilizadas. Em geral grande parte da produção de compósitos em fibra de vidro utiliza estes tipos de fibras.

O vidro do tipo E tem baixo teor alcalino, boa resistência à tracção e relativamente boa rigidez em relação à flexão. Os filamentos usados no



compósito são produzidos num diâmetro de 6 a 15 micron. Na sua forma original estes filamentos têm excelentes propriedades mecânicas. No entanto, nos volumes em que é produzido, a fibra perde quase metade da sua resistência original. A maior causa desta perda de propriedades é a abrasão provocada pelas fibras em contacto umas com as outras durante a fase de produção. Quanto maior for o número de estágios por que passa a fibra, no processo de tecelagem, maior é a perda das suas propriedades.

A procura da indústria aeronáutica e aeroespacial por fibras mais resistentes e que tenham propriedades mecânicas melhores do que as do tipo E, introduziu o tipo de fibra S e R. As fibras do tipo S e R contêm uma maior percentagem de alumínio e sílica, o que pode representar um aumento de 20% a 40% nas propriedades mecânicas, quando comparadas com as do tipo E. O custo extra na produção deste tipo de filamento, com excelente acabamento superficial e baixo volume de produção influencia o seu elevado custo, podendo ser cinco a nove vezes superior ao do vidro E. Outra das vantagens do vidro do tipo R e S é o diâmetro dos filamentos, aproximadamente metade do diâmetro do vidro E. Isto significa que para o mesmo peso de vidro, as fibras do tipo R e S têm mais ou menos duas vezes a área superficial apresentadas pelas fibras do tipo E. Este aumento de área permite que a resina tenha uma melhor aderência às fibras, aumentando a adesão entre a matriz de resina e os filamentos, protegendo e adicionando mais resistência ao compósito. Uma das maiores causas de perda de propriedades mecânicas por parte dos compósitos de fibra de vidro é a água. Tanto o vidro R como o S apresentam uma resistência superior ao meio ambiente do que o vidro E (Mueller, 2004). Na tabela 2, podemos encontrar os diferentes elementos constituintes dos diferentes tipos de fibras de vidro.

Tabela 2. Comparação da composição química dos diferentes tipos de fibras de vidro.

Composição	A	E	S	R
SiO <sub>2</sub>	72.0	52.4	64.4	60.0

$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.5	1.5	25.0	25.0
$\text{CaO}$	10.0	10.0	-	9.0
$\text{MgO}$	2.5	2.5	10.3	6.0
$\text{Na}_2\text{O}$	14.2	14.2	0.3	-
$\text{Bo}_2\text{O}_3$	-	-	-	-

### 2.1.1.2 Fibras de Carbono

Da mesma forma que as fibras de aramida, as fibras de carbono estão no mercado há muito tempo, e por causa das suas características de resistência e rigidez, têm se tornado um material essencial na indústria aeroespacial e automóvel.

A maioria das fibras é produzida a partir de um componente básico conhecido como PAN (Poliacrilonitrila). Na figura 3 pode observar-se a estrutura química das fibras de carbono.

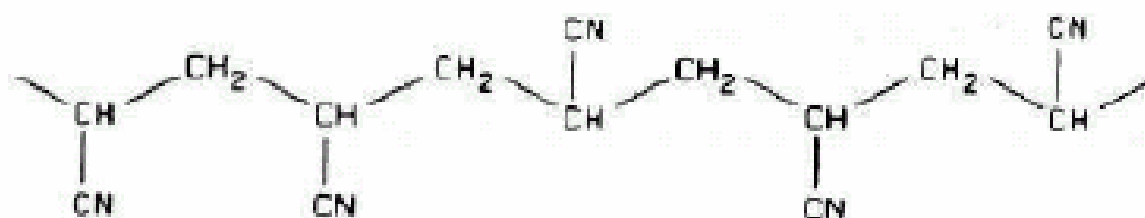


Figura 3. Estrutura química da fibra de carbono

Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica, que inclui carbonização, grafitização e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono de diversas configurações de resistência. Algumas delas podem chegar a ser várias vezes mais resistentes que o aço. A sua cor natural é preta (Smith, 1998).

As fibras de carbono podem ser encontradas em quatro principais tipos de qualidade, dependendo das suas propriedades: Alta Resistência (HS – High Strength), Modulo Intermédio (IM – Intermediary Modulus),

Alta Rigidez ou Modulo (HM – High Modulus) e Superior Rigidez ou Modulo (UHM – Ultra High Modulus). Nestas últimas, as superfícies dos filamentos são ligeiramente oxidadas para melhorar a adesão entre a fibra e a resina. Na tabela 3 podemos encontrar as propriedades dos diferentes tipo de fibras de carbono disponíveis no mercado (Nasseh, 2004).

Tabela 3. Comparação entre diferentes tipos de fibras de carbono.

	Resistência à Tracção [Mpa]	Módulo de Elasticidade [Gpa]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de Elasticidade Específico
Carbono HS	3500	160-270	1,8	90-150
Carbono IM	5300	270-325	1,8	150-180
Carbono HM	3500	325-440	1,8	180-240
Carbono UHM	2000	440+	2,0	240+

Os filamentos de carbono têm um diâmetro típico de 7 a 11 microns e são normalmente agrupados até 48 mil filamentos. A densidade do carbono varia entre todos os seus tipos, mas na maior parte das vezes está localizada entre as fibras de vidro e a aramida. A resistência à tracção é compatível com os vidros R e S e é superior a qualquer outro tipo de fibra quando é necessária elevada rigidez, ou seja, módulo de tracção e flexão (Smith, 1998).

As fibras de carbono também possuem excelente resistência à fadiga e vibração. Uma das desvantagens reside no facto de serem muito quebradiças e desenvolverem a sua resistência com um alongamento muito pequeno. Por isso, normalmente são utilizadas em conjunto com outro tipo de fibra, com o objectivo de aumentar a sua resistência ao impacto, que é normalmente muito baixa. Outra das razões para não usar fibras de carbono sozinhas é que elas são as fibras mais caras de todas as disponíveis no mercado (Mueller, 2004).

### 2.1.1.3 Fibras de Aramida

As fibras de aramida mais conhecidas pelo nome de *Kevlar®*, marca registrada de empresa Dupont, são na verdade um tipo de fibra derivada do *nylon*. A estrutura química desta fibra pode ser observada na figura 4.

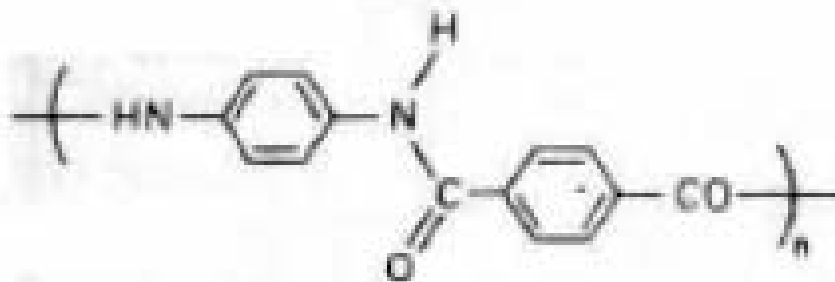


Figura 4. Estrutura química da fibra de aramida

Quando comparadas com outros materiais, as fibras de aramida mostram um resistência específica (resistência/densidade) muito grande, acima de qualquer outro tipo de fibra disponível no mercado. São cinco vezes mais resistentes que o aço e duas mais resistentes que o vidro E, o que possibilita produzir peças de fibra de aramida com um fracção do peso das de vidro E (Nasseh, 2004)

A resistência ao impacto é também um dos pontos fortes das fibras de aramida, especialmente no que se refere à capacidade de resistir a choque cíclicos. A sua alta resistência ao impacto impede também, a propagação de fendas e micro fissuras o que não ocorre em compósito com fibra de vidro. Quanto a resistência à compressão os compósitos de fibra de aramida não apresentam grandes vantagens relativamente aos outros tipos de fibras (Smith, 1998).

As fibras de aramida não se comportam como as outras fibras, assemelham-se mais aos metais, uma vez que são elásticas em baixas deformações e quase perfeitamente plásticas em altas deformações. Isso significa que deve ser evitado o uso de fibras de aramida onde é necessária uma grande resistência à compressão (Mueller, 2004).

## 2.1.1.4 Fibras Naturais

A aplicação de fibras naturais em materiais compósitos, tem merecido uma especial atenção por parte dos investigadores, particularmente devido ao seu baixo preço e às preocupações cada vez maiores com o meio ambiente. Na figura 5 está indicada uma possível classificação das fibras naturais de acordo com a sua origem (Janarthanan, 2008).

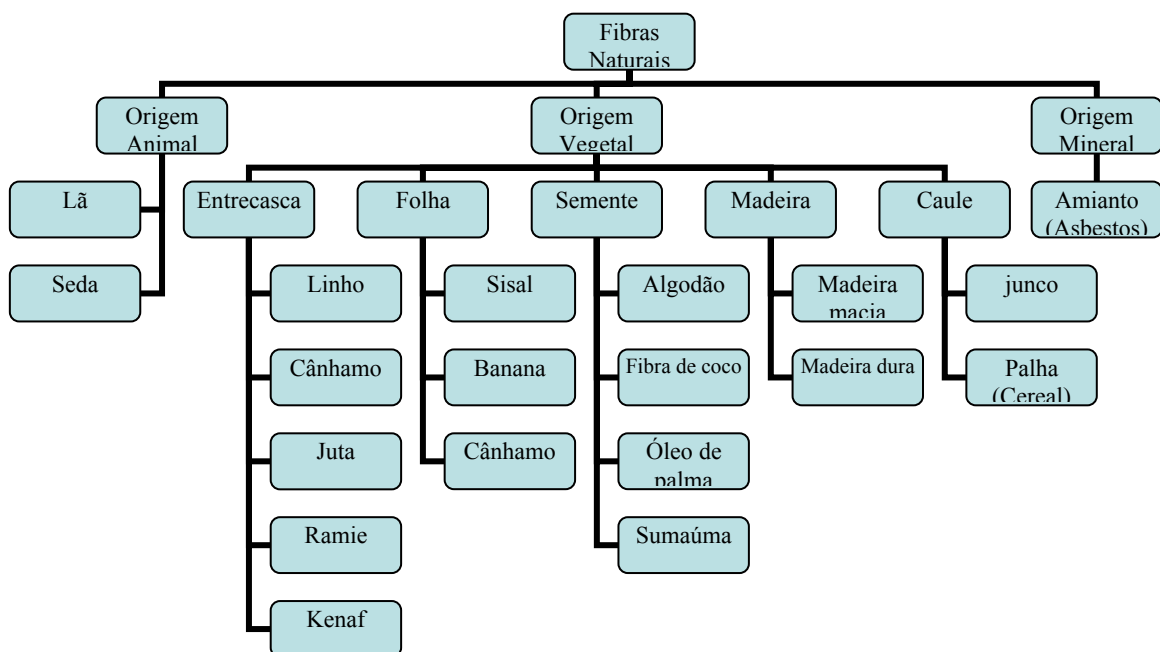


Figura 5. Classificação das fibras naturais de acordo com a sua origem

Quando comparadas com as fibras sintéticas, as fibras de origem natural apresentam algumas vantagens, tais como baixa densidade, alta deformabilidade, baixa abrasividade aos moldes e aos equipamentos de mistura (Tajvidi, 2003). No entanto a principal vantagem das fibras, reside no facto de ser um recurso renovável. Outro dos aspectos a ter em conta e uma vez que as questões ambientais estão na ordem do dia, é o facto de ser um material biodegradável e facilmente reciclável (tabela 4).

Fisicamente, as fibras naturais (vegetais) são compostas de fibrilas, material celulósico, unido por material ligante. Em relação à composição química, as fibras naturais são muito semelhantes, sendo compostas basicamente por celulose, lignina, hemicelulose associada a outros materiais presentes em pequenas proporções (Santiago, 2007).

Tabela 4. Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais

Propriedades	Coco	Sisal	Malva	Amianto Crisotila	Polipropileno (filamento)
Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )	1177	1370	1409	2200 a 2600	913
Vol. De vazios permeáveis (%)	56,6	60,9	74,2	-	-
Absorção máxima (%)	93,8	110,0	182,2	-	-
Alongamento na ruptura (%)	23,9 a 51,4	4,9 a 5,4	5,2	2	22,3 a 26,0
Resistência à tracção [Mpa]	95 a 118	347 a 378	160	560 a 750	250
Módulo de elasticidade [Gpa]	2,8	15,2	17,4	164	2,0

A grande diferença na composição química das fibras naturais, deve-se a vários aspectos, de onde se destacam a idade da planta o tipo de solo e processo de obtenção da fibra (Li *et al*, 2000).

As fibras são na verdade feixes constituídos por células individuais que, por sua vez, se compõem de microfibrilas. Essas microfibrilas, por sua vez, são ricas em celulose, polímero vegetal com grau de polimerização da ordem de 25000. As células são compostas por quatro camadas de microfibrilas e uma cavidade central (figura 6). As duas camadas mais externas têm estrutura reticulada. A camada subsequente (S2) apresenta

microfibrilas orientadas segundo o ângulo  $\theta$ , em relação ao eixo longitudinal da célula, em espiral. Esta é também a camada mais espessa e com maior teor de celulose (Clemons, 2008; Júnior *et al*, 1997).

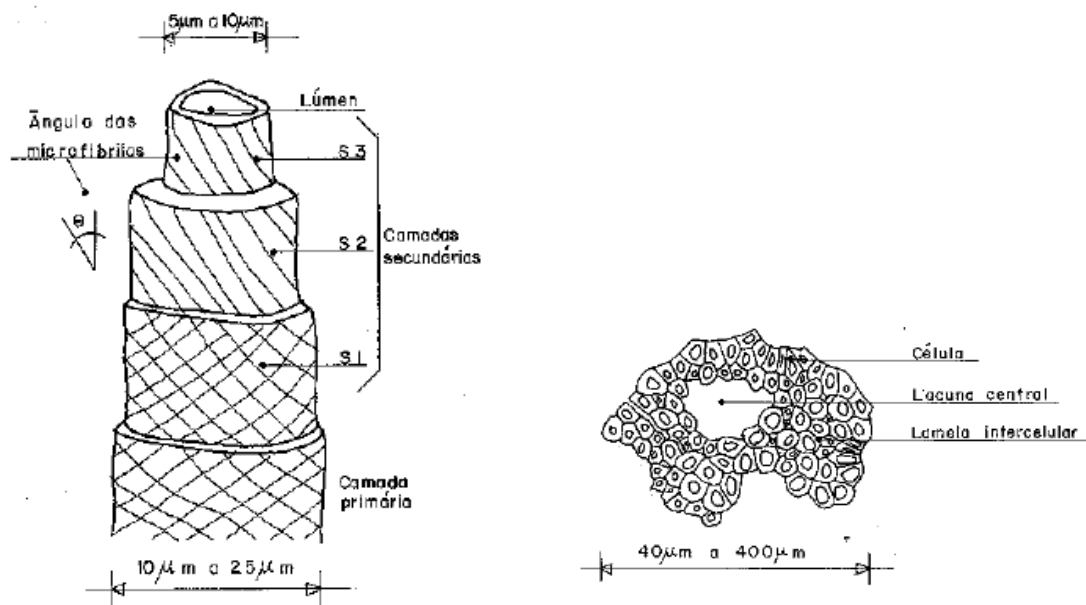


Figura 6. Estrutura das fibras naturais

As diversas células que compõem a fibra encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular, composta de hemicelulose, pectina e, principalmente, lignina (70%, em média). A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade denominada lacuna, responsável pela sua elevada capacidade de absorver água (Júnior *et al*, 1997).

Tabela 5. Propriedade da estrutura das fibras naturais

Fibra	Celulose (% massa)	Lignina (%massa)	Ângulo $\theta$ das microfibrilas (graus)
Malva	76,0	10,0	8
Sisal	78,6	9,9	10-22
Coco	53,0	40,8	30-49

---

A tabela 5 apresenta os teores em massa de celulose e de lignina das fibras e o ângulo médio ( $\theta$ ), formado pelas microfibrilas com o eixo longitudinal da célula.

Ao analisar os dados da tabela 5, verifica-se que a resistência à tracção e o módulo de elasticidade das fibras variam directamente com o teor de celulose e inversamente com o ângulo  $\theta$  das microfibrilas. Também se constata que o alongamento máximo de ruptura aumenta com o ângulo  $\theta$ , pois o trabalho de fractura necessário para o alongamento das microfibrilas é superior.

As características macroscópicas de maior interesse no estudo das fibras são aquelas que estão directamente ligadas com o comportamento dos compósitos resultantes. As propriedades físicas e mecânicas das fibras de origem natural, em geral objecto de estudo, são as seguintes:

- Dimensões: A relação entre comprimento e o diâmetro das fibras é factor determinante na transferência de esforços para a matriz. Outro ponto interessante é a secção transversal irregular das fibras vegetais, bem como seu aspecto fibrilado, que exercem influência positiva sobre a ligação dessas fibras à matriz.
- Volume de vazios e absorção de água: Devido à grande percentagem volumétrica de vazios permeáveis, a absorção é muito alta nos primeiros instantes de imersão. Como consequência directa advém uma interferência negativa, que é umas das causas directas da delaminação e fraca aderência da fibra à matriz.

Por outro lado, o elevado volume de vazios contribui para um menor peso, uma maior absorção acústica e uma menor condutibilidade térmica dos componentes obtidos.



- Resistência à tracção: Semelhante, em média, à das fibras de polipropileno.
- Módulo de elasticidade: As fibras vegetais classificam-se como de baixo módulo, um factor determinante para o seu emprego em componentes construtivos que trabalhem no estágio pós-fissurado, com elevadas absorção de energia e resistência a esforços dinâmicos (Júnior *et al*, 1997).

Deve ter-se em conta que as fibras vegetais são heterogêneas e que as propriedades mecânicas, bem como as suas características físicas, têm um elevado desvio padrão com um coeficiente de variação elevado, chegando em alguns casos a valores da ordem dos 50%. As características das fibras naturais como materiais hidrofílicos são opostas às propriedades hidrofóbicas dos materiais poliméricos (Santiago, 2007). Nas tabelas 4 e 6 são apresentadas propriedades de algumas fibras de origem natural e da fibra de vidro do tipo E.

Tabela 6. – Propriedades de alguns tipos de fibras naturais usados no fabrico de materiais compósitos.

Propriedades	Vidro - E	Linho	Cânha amo	Juta	Fibras Ramie	Côco	Sisal	Abaca	Algodão
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	2.55	1.4	1.48	1.46	1.5	1.25	1.33	1.5	1.51
Tensão Cedência [10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup> ]	2400	800- 1500	550- 900	400- 800	500	220	600- 700	980	400
Módulo de Young [Gpa]	73	60-80	70	10-30	44	6	38		12

Specific [E/densidade]	29	26-46	47	7-21	29	5	29	8
---------------------------	----	-------	----	------	----	---	----	---

É um dado adquirido que a compatibilidade do material lignocelulósico com a matriz tem um papel fundamental na determinação das propriedades do compósito.

Os materiais lignocelulósicos possuem grupos hidroxila polares na superfície devido predominantemente à celulose (figura 7) e à lignina, pois estes grupos polares têm grande facilidade em interagir com matrizes poliméricas polares, como é o caso das resinas fenólicas (Paiva *et al*, 1999).

Com o intuito de melhorar a aderência das fibras à matriz, vários têm sido os tratamentos estudados, quer a nível das fibras, quer a nível da matriz. Os tratamentos pretendem modificar a camada superficial da fibra para melhorar a adesão à matriz.

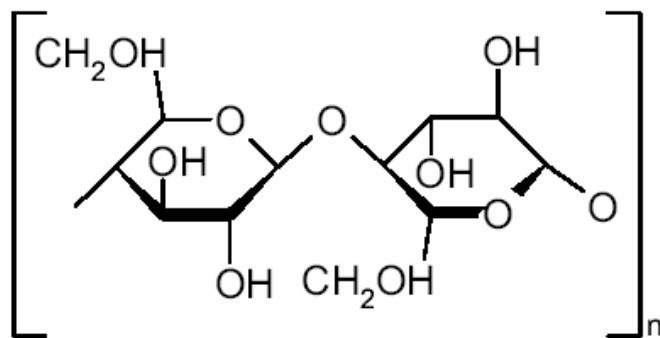


Figura 7. Estrutura química da celulose (Monómero)

#### 2.1.1.4.1 Fibras de Madeira

De todos os materiais de origem biológica, a madeira é sem dúvida o mais conhecido e utilizado. O lenho de uma árvore contém grande quantidade de substâncias que são utilizadas como matérias-primas em quase todos os campos tecnológicos (Klock *et al*, 2005).

A madeira em alguns países é o material de construção mais usado, com uma produção anual que ultrapassa todos os outros materiais de construção como o betão e o cimento. Para além de ser utilizada nas estruturas e nos revestimentos das casas, edifícios, pontes, etc., é também usada no fabrico de materiais compósitos, como por exemplo, contraplacados e painéis reforçados.

A madeira é um material compósito natural, formado fundamentalmente por um arranjo complexo de células de celulose reforçadas por uma substância polimérica, denominada por lignina, entre outros compostos orgânicos. A resistência mecânica da madeira é altamente anisotrópica, sendo a sua resistência à tracção muito maior segundo a direcção paralela ao tronco da árvore (Smith, 1998).

As árvores são classificadas em dois grandes grupos designados por: de lenho macio (gimnospérmicas) e de lenho rijo (angiospérmicas). A base botânica para a sua classificação reside no facto da semente estar coberta ou não. Se a semente da árvore estiver exposta, a árvore tem um lenho do tipo macio, enquanto se a semente estiver coberta a árvore tem um lenho do tipo rijo. Embora existam algumas excepções, uma árvore de lenho macio é uma árvore que mantém as suas folhas, enquanto uma árvore de lenho rijo perde as suas folhas anualmente. Em geral as madeiras provenientes de árvores gimnospérmicas são fisicamente macias, e a maioria das madeiras de árvores angiospérmicas são fisicamente rijas (duras) (Foulger, 1969).

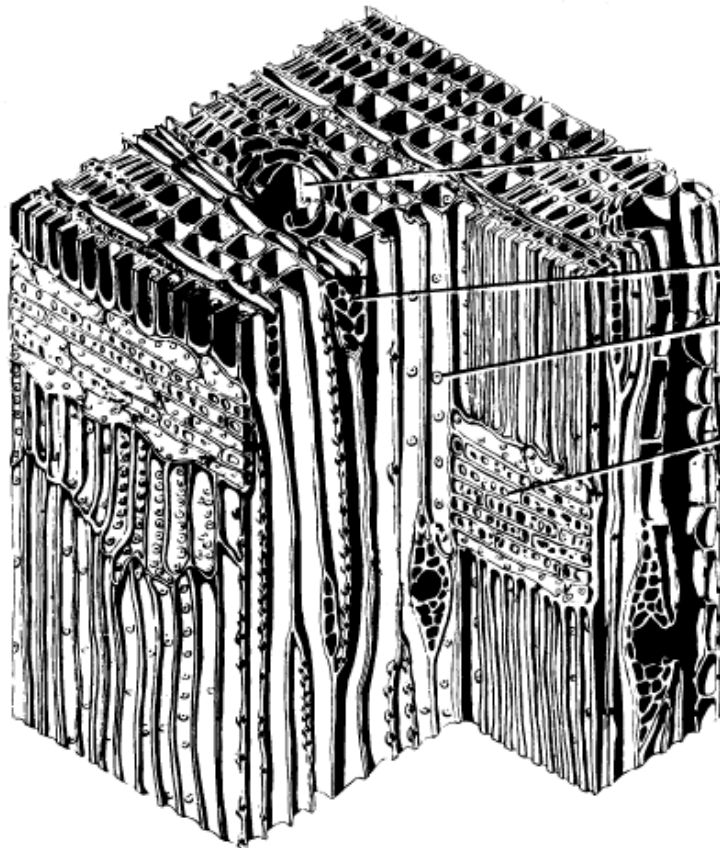


Figura 8. Microestrutura de um bloco de madeira macia (Ampliação 75 x)

A figura 8 mostra a microestrutura de um pequeno bloco de madeira macia. Nesta micrografia, é facilmente visível o maior tamanho das células do lenho de primavera. A madeira do tipo macio é formada fundamentalmente por células tubulares, longas e de parede fina, denominadas traqueídeos.

O grande espaço aberto no centro das células designa-se por lúmen e é usado para a condução da água. O comprimento de um traqueídeo longitudinal é de cerca de 3 a 5 mm e o seu diâmetro é de cerca 20 a 80  $\mu\text{m}$ . Pequenos orifícios ou picadas nas extremidades das células permitem ao líquido passar de uma célula para outra (Smith, 1998)

Contrariamente às madeiras macias, as madeiras rijas possuem vasos de grande diâmetro para a condução dos fluidos. Os vasos são

---

estruturas de parede fina, constituídos por elementos individuais, formando-se segundo a direcção longitudinal do tronco da árvore.

A madeira rija (figura 9) pode ser classificada como de porosidade de anel ou de porosidade difusa, dependendo de como os vasos estão dispostos nos anéis de crescimento. Numa madeira rija de porosidade em anel, os vasos que se formam no lenho de primavera são maiores do que os que se formam no lenho tardio. Numa madeira rija de porosidade difusa, os diâmetros dos vasos são praticamente iguais ao longo de todo o anel de crescimento.

As células longitudinais responsáveis pela sustentação do tronco das árvores de madeira rija são fibras. Nas árvores de madeira rija, as fibras são células alongadas com extremidades aguçadas com paredes geralmente espessas. O comprimento das fibras varia entre 0,7 e 3 mm e em média, o seu diâmetro é inferior a cerca de 20  $\mu\text{m}$  (Foulger, 1969).

Os principais constituintes das células do lenho são a celulose, as hemiceluloses, e a lignina. As moléculas de celulose cristalina constituem entre 45 e 50% do material sólido do lenho. A celulose é um polímero linear formado por unidades de glicose, com um grau de polimerização que varia entre 5 000 e 10 000. As ligações covalentes, no interior e entre as unidades de glicose, dão origem a uma molécula muito direita e rígida, com grande resistência à tracção. As ligações laterais entre as moléculas de celulose efectuem-se por meio de ligações de hidrogénio e ligações dipolares permanentes. As hemiceluloses constituem entre 20 e 25% do peso do material sólido do lenho e são moléculas amorfas ramificadas, contendo vários tipos de unidades de açúcar. As moléculas de hemicelulose tem um grau de polimerização entre 150 e 200. O terceiro constituinte principal das células do lenho é a lignina, a qual constitui cerca de 20 a 25% em peso do material sólido. A lignina é um materiais poliméricos muito complexos, com ligações cruzadas do tipo tridimensional, formadas a partir de unidades fenólicas.

A parede celular é formada principalmente por microfibrilas ligadas entre si pela lignina. Supõem-se que as microfibrilas são formadas por um núcleo cristalino de celulose, rodeado por uma região amorfa de hemicelulose e lignina. A lignina fornece rigidez à parede celular e permite que esta possa resistir a forças de compressão. Para além dos materiais sólidos, as células do lenho podem absorver água até 30% do seu peso (Smith, 1998).

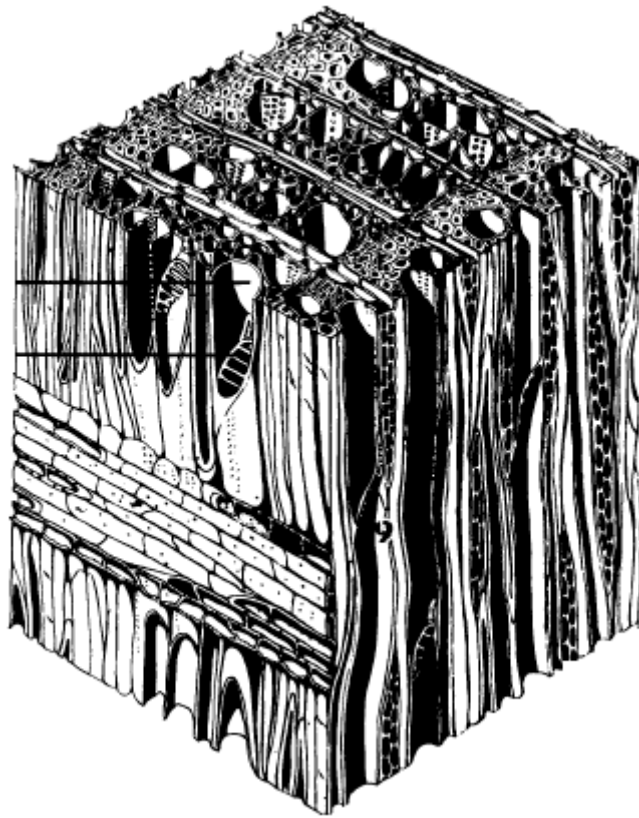


Figura 9. Microestrutura de um bloco de madeira dura (Ampliação 75 x)

- Fibras de Faia

A madeira de Faia (*Fagus Grandifolia*) está classificada como pesada, dura, forte, altamente resistente aos impactos e muito adequada para curvatura a vapor.

O alburno da faia americana é branco com matiz avermelhada, enquanto o cerne tem uma cor marrom avermelhada com tonalidades claras e escuras. A faia americana tende a ser um pouco mais escura e menos consistente que a faia europeia. Geralmente, esta madeira possui uma nervura recta com uma textura fechada e uniforme. As principais propriedades da madeira de faia são apresentadas na tabela 7:

Tabela 7. Propriedades da madeira de Faia

Gravidade Específica	0,64
Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	721
Encolhimento Volumétrico Médio [%]	13
Módulo de Elasticidade [MPa]	11.859
Dureza [N]	5782

Fonte AHEC (American Hardwood Export Council)

- Fibras de Pinho

A madeira de pinho Portuguesa (*Pinus pinaster*), mais conhecida por pinho bravo, apresenta valores de densidade e módulo de elasticidade bastante superior à generalidade das espécies de resinosas, e está classificada com sendo uma madeira do tipo macio. Na tabela 8 são apresentadas algumas propriedades da madeira de pinho.

Tabela 8. Propriedades da madeira de Pinho (Mateus, 1961)

Massa Volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	550 – 600
-------------------------------------	-----------

---

---

Tensão de Ruptura [MPa]	98.4
Módulo de Elasticidade [MPa]	13800
Dureza [N]	2687

---

### 2.1.2 Resinas

Geralmente, os objectos feitos de resina são frágeis. No entanto, e quando combinados com fibras de alta resistência, podem exibir características mecânicas muito acima do seu limite de ruptura. Na prática, a resina tem apenas a função de prender as fibras na posição desejada e promover uma barreira química contra a água.

As fibras têm em geral um alongamento médio de 5% antes da ruptura, enquanto a maioria das resinas de poliéster alongam menos de 2%. A resina tem tendência a romper antes das fibras, o que ocasionará uma sobrecarga e uma consequente quebra das fibras no instante seguinte.

Dos vários tipos de resinas disponíveis no mercado as mais utilizadas para produção de materiais compósitos são as resinas de poliéster, estervinílicas e as resinas epoxidícas. São conhecidas como resinas termoendurecíveis, o que significa que quando catalisadas e curadas, tornam-se insolúveis, ao contrário das termoplásticas que podem ser dissolvidas, aquecidas e reutilizadas para outras aplicações.

Embora a resistência das resinas seja muitas vezes inferior à das fibras, o seu papel é de vital importância. São elas que protegem as fibras contra agressões externas, contra a absorção de água, abrasão e ataques químicos. As resinas devem ainda ser capazes de aderir com firmeza às fibras de reforço (Nasseh, 2004).

Para que o compósito apresente boas propriedades, as resinas devem permitir que todas as tensões atravessem o compósito, o que



depende basicamente do tipo de colagem que cada resina proporciona às fibras. Qualquer tipo de fissura ou ponto fraco causará uma redução na resistência do compósito.

No que se refere às propriedades mecânicas, a resina ideal deveria ser flexível e ao mesmo tempo ter uma elevada resistência à tracção. No entanto estas duas propriedades são difíceis de serem conjugadas. Uma alta resistência significa ter uma resina quebradiça, enquanto uma elevada deformação significa ter uma resina de baixa resistência à tracção, baixa resistência à temperatura (HDT), e baixa resistência à absorção de água. A temperatura à distorção térmica – HDT é a temperatura até à qual se espera que as propriedades das resinas se mantenham constantes.

Embora uma elevada resistência à tracção e um bom alongamento sejam importantes, a resistência à fadiga também é essencial durante o ciclo de vida do compósito. Assim, a resina deve ser capaz de suportar grandes deformações sem apresentar distorção permanente, e deve resistir e dissipar as micro fissuras dentro do compósito.

Para um compósito apresentar elevadas propriedades mecânicas, o teor de fibras deve ser o maior possível, enquanto que para uma maior resistência ao meio ambiente o compósito deve ter um alto teor de resina, pelo menos nas camadas mais externas. Quando os dois factores têm que ser conciliados, é muito importante que sejam utilizadas resinas de alta performance.

A viscosidade típica para as resinas está na faixa de 300 a 800 cps, mas deve ter-se em atenção que a viscosidade da resina varia em função da temperatura. Durante as estações mais quentes, a viscosidade de resina tende a diminuir, enquanto que no Inverno tende a aumentar.

Um dos requisitos para a selecção da resina é a habilidade desta em conseguir boas propriedades mecânicas e resistência química, quando curada à temperatura ambiente. Existem muitos tipos de resinas disponíveis no mercado que apresentam resultados excelentes depois de

---

curadas a altas temperaturas. Este tipo de procedimento de auxílio da cura através do aumento de temperatura, que é chamado de pós-cura, permite promover um relaxamento molecular da resina a uma temperatura elevada, e consequentemente melhorar a cura da matriz de resina.

Para um compósito de alta performance o melhor resultado é obtido quando ele pode ser pós-curado a uma temperatura normalmente acima dos 75° C (Nasseh, 2004).

#### 2.1.2.1 Resinas de Poliéster

As resinas do tipo de poliéster (figura 10) insaturado são produzidas pela reacção de ácidos insaturados, onde os mais comuns são o ácido fumárico e o anidrido maleico, em combinação com um ácido saturado do tipo orto ou isoftálico combinados com um glicol, como o propileno-glicol ou etileno-glicol, e dissolvido num monómero reactivo, normalmente estireno.

Além de dissolver a resina poliéster, o monómero de estireno tem a importante propriedade de reagir aos ácidos saturados durante o processo de cura, fazendo as ligações das moléculas de poliéster e formando um copolímero de poliéster e estireno. Neste caso, o monómero não é um solvente, e sim uma parte activa da resina (Smith, 1998).

Vários tipos diferentes de ácidos, glicóis, agentes modificantes e micro aditivos podem ser usados na formulação da resina, dependendo do tipo de propriedades requeridas. Devido à grande variedade de ácidos e glicóis disponíveis, é possível formular uma resina específica para cada tipo de aplicação (Nasseh, 2004).

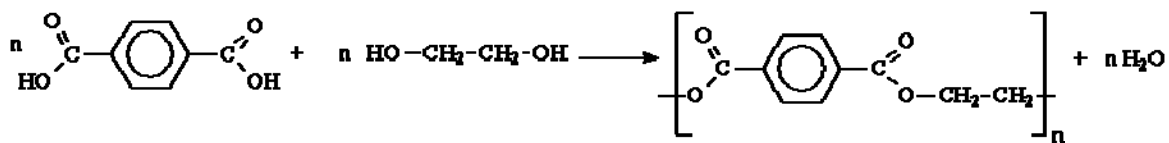


Figura 10. Estrutura química da resina de poliéster

- Processo de Cura

Para produzir um compósito de poliéster, a resina apresenta primeiro o tempo de gel e depois o de cura. Este processo é feito a partir da adição de catalisadores. Nas resinas de poliéster, os catalisadores são normalmente peróxidos orgânicos em pasta ou líquido, diluídos aproximadamente em 50 % em solução. O catalisador mais comum é o peróxido de metil-etilcetona (MEKP).

A taxa de catalisador usada normalmente é de 1 a 2%. Não se deve nunca utilizar dosagens menores do que as recomendadas pelo fabricante do produto uma vez que o compósito poderá não curar totalmente.

O processo de cura inicia-se quando o catalisador é misturado, sendo que a velocidade de cura pode ser controlada de modo a atrasar o início de cura da resina. O processo de cura pode ser diminuído se for adicionado calor sobre o compósito, ou se for adicionada maior dosagem de acelerador para promover uma reacção mais rápida da mistura à temperatura ambiente.

Muitos componentes podem ser usados como aceleradores, sendo os mais comuns os à base de cobalto. Geralmente é necessária uma pequena percentagem de acelerador na resina de poliéster, de aproximadamente 0,6%.

O processo de cura da resina de poliéster pode ser dividido em três estágios. O primeiro de gelificação (delttime), é o período que vai desde a hora em que se mistura o catalisador até ao ponto em que a resina

começa a ficar na forma de gel e se dá o aumento da temperatura. A partir deste momento não se poderá utilizar a resina. Geralmente em resinas poliéster, a temperatura máxima durante o processo de gel pode chegar aos 150 °C. Esta temperatura limite denomina-se de pico exotérmico.

Após o tempo de gel vem o tempo de endurecimento, que é o período necessário para o compósito obter uma parte significativa das suas propriedades mecânicas e a peça poder ser retirada do molde. O estágio final é o tempo de maturação durante o qual o compósito desenvolve toda a sua estabilidade e dureza. O processo de maturação é a parte vital do ciclo de cura, o que pode levar dias ou talvez semanas, dependendo da temperatura na qual o compósito for mantido. Esta temperatura tem de ser exactamente a mesma temperatura a que ele foi processado. Quando é preciso obter melhores propriedades, poderá ser necessário proporcionar ao conjunto final uma pós-cura a temperaturas mais elevadas. Em geral, quanto maior for a temperatura, menor será o tempo necessário para se obterem as propriedades totais do compósito. Essa temperatura não deve no entanto superar o valor máximo da temperatura de deformação do compósito (HDT) (Nasseh, 2004).

- Propriedades da Resina

De entre as propriedades das resinas de poliéster, o baixo alongamento antes da rotura, alta contracção, baixo poder de colagem e baixas propriedades de resistência à água são os seus pontos vulneráveis.

O alongamento antes da ruptura é importante, uma vez que a matriz de resina é a responsável pela transmissão de tensões através das fibras no compósito. A resina deve ser capaz de alongar, pelo menos a

---

mesma quantidade que as fibras alongam. Se a resina rompe antes das fibras, o compósito irá falhar a uma carga bem mais baixa do que as fibras são capazes de suportar. O número típico do alongamentos de uma resina de poliéster é de 1 a 2%, o que está bem abaixo do alongamento médio da maioria das fibras.

Outro dos aspectos a ter em conta na selecção do tipo de resina é a contracção deste material. As resinas de poliéster desenvolvem uma grande contracção durante o processo de cura, cujo valor típico é por volta de 6 a 8%, o que resultará no aparecimento de tensões permanentes dentro do compósito.

A adesão das fibras à resina da matriz é também um factor de importância vital. Enquanto a adesão do poliéster é perfeitamente aceitável para a maioria dos casos, esta propriedade não é tão boa quando comparada com outros tipos de resina como é o caso da resina *epoxidica*, e pode ser um factor limitativo para compósitos que necessitem de alta performance.

A resistência à absorção de água é também de primordial importância. Na maior parte dos casos, as resinas de poliéster não possuem uma resistência elevada contra a penetração da água (resistência à hidrólise). Existem alguns tipos de aditivos que podem ser adicionados à resina, cuja finalidade é modificar as suas características, de modo a aumentar as suas propriedades. No caso de se pretender melhorar a qualidade superficial, é possível adicionar uma solução de monómero de estireno e parafina para a superfície não ficar pegajosa (Smith, 1998).

#### 2.1.2.2 Resinas Epoxidicas

As resinas epoxidicas (figura 11) são uma classe de resinas termoendurecíveis com uma grande variedade de aplicações, o que dá extrema versatilidade de utilizações em diferentes técnicas e processos.

Devido à sua versatilidade e vantagens, relativamente às outras resinas, podem ser encontradas hoje em diversas aplicações. Podem ser usadas como resinas de laminação, adesivos, selantes, tintas, vernizes e em muitas outras aplicações.

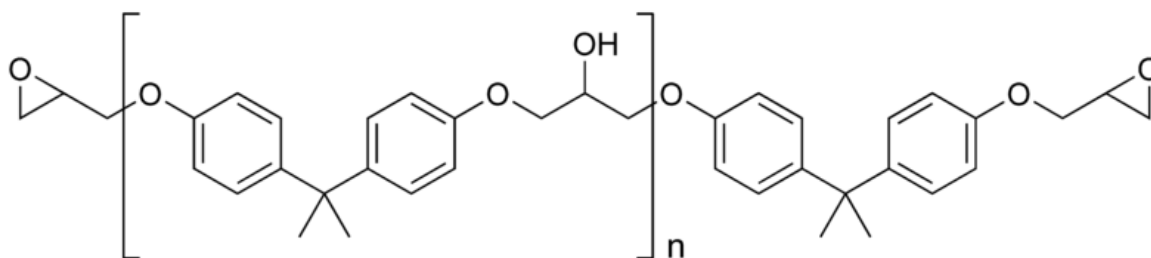


Figura 11. Estrutura química do monómero da resina epoxidica

As resinas epoxídicas podem definir-se como todas aquelas em que as ligações químicas ocorrem através de grupos de radicais *epoxy*, que são o centro da reacção. Podem ser líquidas ou sólidas. No estado sólido, elas são termoplásticas com a capacidade de serem dissolvidas pelo calor e endurecidas pelo arrefecimento. A conversão numa resina termoendurecível ocorre através do processo de polimerização pela adição de um endurecedor e, uma vez adicionado, inicia-se uma reacção irreversível de ligação entre moléculas (Smith, 1998).

Ao contrário das resinas de poliéster, em que as proporções de catalisador são geralmente de 1 a 2%, as resinas epoxídicas têm uma taxa de resina/endurecedor completamente diferente. Dependendo do sistema utilizado, este pode variar em 100/12, 100/25, 100/30 e até mesmo 100/50 partes em peso de resina e endurecedor. As resinas epoxídicas podem ser formuladas de várias formas diferentes, e a quantidade de combinações possível é praticamente infinita. Enquanto é possível variar a taxa de catalisador nas resinas de poliéster com o objectivo de controlar o *gel time*, o processo de cura das resinas epoxídicas não permite isso. Assim, o controlo do *gel time* da resina pode ser apenas conseguido com a

---

mudança da temperatura ou pela escolha do tipo de endurecedor que pode ser do tipo lento, médio ou rápido, de modo a poder controlar o tempo de *gel time*.

As resinas epoxidícas geralmente exibem grandes vantagens em termos de versatilidade de processos de cura, o que as torna tão populares. É de suma importância para o compósito que a matriz de resina seja capaz de aderir a todas as fibras e transmitir as tensões através do compósito. Neste aspecto, nenhum outro sistema supera as resinas *epoxidícas*. A baixa contracção das resinas epoxidícas é outro ponto de vital importância. As resinas de poliéster e as estervinílicas têm uma faixa de 50 a 60% de sólidos, enquanto boa parte das epoxidícas têm 100% e uma contracção após cura de aproximadamente 2%. Isto equivale a um valor quatro vezes menor, quando comparado à contracção das resinas poliéster. Essa baixa contracção reduz as tensões internas dentro do compósito, o que faz com que os compósitos construídos com resinas epoxidícas tendam a ter uma maior resistência à fadiga.

Outra das vantagens das resinas epoxidícas são as propriedades mecânicas, pois podem ser orientadas de modo a ter um valor acima de 6% de alongamento. Na verdade, se a resistência à tracção de uma resina for modificada é possível obter alongamentos acima de 8%. Esse factor faz com que a matriz de resina epoxidíca seja capaz de transmitir às fibras todas as solicitações e, provavelmente quebrar somente após a ruptura das fibras.

O alto poder de colagem das resinas epoxidícas também reduz a possibilidade de uma possível falha por delaminação, o que ocorre normalmente entre as camadas do reforço e a matriz de resina. As resinas epoxidícas exibem também uma excelente resistência à abrasão e uma boa resistência à absorção de água (Nasseh, 2004).

## 2.1.2.3 Resinas Estervinílicas

Associando a facilidade de aplicação e cura das resinas poliéster com as excelentes propriedades de resistência da resina epoxidíca, as resinas estervinílicas (figura 12) têm sido cada vez mais utilizadas na indústria. A formulação química desta resina parte de um radical *epoxy*, e por esse motivo, têm de ser aceleradas e catalisadas em proporções precisas.

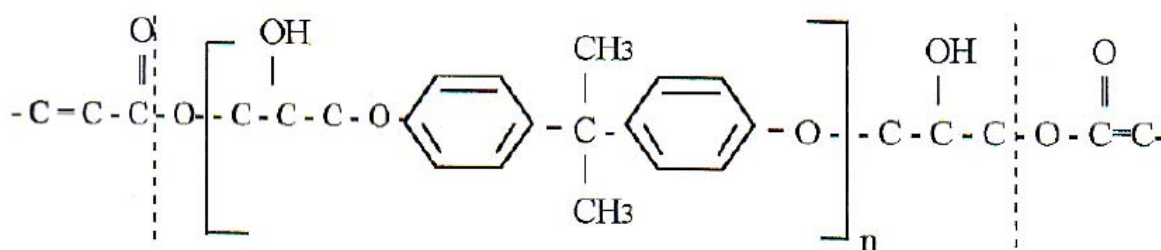


Figura 12. Estrutura química da resina estervinílica

A resina estervinílica é similar à resina poliéster que reage com o estireno, normalmente na quantidade de 45%, e na sua cadeia o processo de cura é iniciado pela adição de um catalisador e de um acelerador. Ao contrário das resinas poliéster, a reacção da molécula ocorre apenas no final da terminação da cadeia, ao invés de ocorrer em vários pontos intermédios. Isso torna a resina muito mais flexível, possibilitando a absorção de choques em maior quantidade. Nas resinas de poliéster essas ligações ocorrem ao longo de toda a cadeia, o que aumenta a rigidez e diminui a resistência ao impacto.

O alongamento médio das resinas estervinílicas está na faixa de 4 a 6%. Estes valores de alongamento são conseguidos apenas para processos de cura a elevadas temperaturas.

Compósitos fabricados com resina estervinílica apresentam uma menor absorção de água e menor hidrólise, resultante da quebra da



cadeia molecular pela acção da água, quando comparada com as resinas de poliéster. Isso ocorre principalmente devido a dois factores: menor polaridade das resinas estervinílicas e reduzidos pontos de ataque químico.

Contrariamente às resinas de poliéster, as resinas estervinílicas não contêm múltiplas ligações éster, que são relativamente instáveis, ou duplas ligações carbono-carbono na estrutura da cadeia polimérica. Nas resinas poliéster esses pontos são susceptíveis de sofrerem ataques por hidrólise.

A resina estervinílica pode ser enquadrada entre a de poliéster e a epoxídica, quando comparadas em relação às propriedades mecânicas, adesão, resistência à hidrólise e preço (Nasseh, 2004).

#### 2.1.2.4 Resinas Fenólicas

Os materiais termoendurecíveis fenólicos foram, de entre os materiais plásticos importantes, os primeiros a ser utilizados pela indústria. As patentes originais de reacção do fenol com o formaldeído para produzir o plástico fenólico baquelite foram registadas por Baekeland em 1909.

Os plásticos fenólicos (figura13) são ainda utilizados porque têm um baixo custo e boas propriedades de isolamento eléctrico e térmico, bem como boas propriedades mecânicas. São facilmente moldados, mas as suas cores são limitadas, normalmente são pretos ou castanhos.

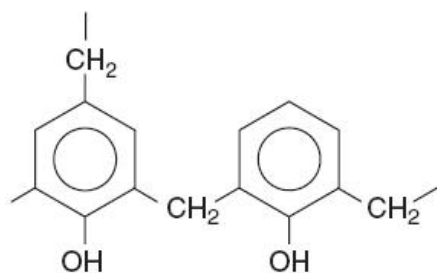


Figura 13. Estrutura química da resina fenólica

As resinas fenólicas são geralmente produzidas pela reacção do fenol com o formaldeído por polimerização por condensação, formando-se água como subproduto. Pode usar-se praticamente qualquer fenol activo ou aldeído. Por conveniência de moldagem, produzem-se normalmente as resinas fenólicas em duas etapas (novolac) (Smith, 1998).

Na primeira produz-se uma resina termoplástica frágil que pode ser fundida, mas em que não se formam ligações cruzadas para originar um sólido reticulado. Este material é preparado fazendo reagir menos de uma mole de formaldeído com uma mole de fenol, na presença de um catalisador ácido.

A adição de hexametileno tetramina (hexa), que é um catalisador básico da resina fenólica, produzida na primeira etapa, torna possível a criação de ligações cruzadas de metileno formando um material termoendurecível. Quando se submete a resina novolac contendo hexa a determinadas condições de calor e pressão, a hexa decompõe-se produzindo amónia, que providencia as ligações de metileno para se formar uma estrutura reticulada (Smith, 1998).

A temperatura necessária para originar as ligações cruzadas (cura) da resina novolac varia entre 120 e 177°C. Os componentes moldados são feitos combinando a resina com vários materiais de enchimento que, por vezes, correspondem até 50 a 80% do peso total dos componentes moldados. Os materiais de enchimento reduzem a contracção durante a moldagem, diminuem o custo e aumentam a resistência mecânica. Também podem ser utilizados para melhorar as propriedades de isolamento eléctrico e térmico.

O número elevado de ligações cruzadas da estrutura aromática confere dureza, rigidez e resistência mecânica elevadas, assim como boas propriedades de isolamento eléctrico e térmico e resistência química.

Alguns dos vários tipos de compostos fenólicos produzidos para moldagem são:

- Compostos de uso geral - Estes materiais são normalmente reforçados com serradura, de modo a aumentar a resistência ao impacto e diminuir o custo.
- Compostos de alta resistência ao impacto - Estes compostos são enchidos com celulose (fibra de algodão e pedaços de tecido), fibras minerais e de vidros para conferir resistências ao impacto até valores da ordem de 960 J/m.
- Compostos de elevado isolamento eléctrico - Estes materiais são reforçados com minerais, como por exemplo a mica, de modo a aumentar a resistência eléctrica.
- Compostos resistentes ao calor - Estes materiais são enchidos com minerais (por exemplo, asbesto) e são capazes de suportar, durante bastante tempo, temperaturas entre 150 e 180°C.

Os compostos fenólicos são muito utilizados em dispositivos de instalações eléctricas, dispositivos de ligação e interruptores electromagnéticos (relés) para telefones. Os engenheiros de automóveis utilizam os compostos fenólicos para moldagem no fabrico de componentes de travões e peças da transmissão. As resinas fenólicas são extensamente utilizadas em manípulos, puxadores e placas exteriores de pequenos electrodomésticos. Como constituem adesivos resistentes a temperaturas elevadas e à humidade, as resinas fenólicas são utilizadas em alguns tipos de laminados e contraplacados de madeira. Usam-se também grandes quantidades de resinas fenólicas como ligante da areia

de fundição e na fundição em carapaça (Smith, 1998). Na tabela 9 são apresentadas as propriedades de alguns tipos de resinas fenólicas.

Tabela 9. Propriedades de alguns compósitos com resina fenólica

<b>Material</b>	<b>Densidade g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Resistência à tracção MPa</b>	<b>Resistência ao impacto Izod, (J/m)</b>	<b>Resistência dielétrica kV/mm</b>	<b>Temp. Máx de utilização ,(°C)</b>
Fenólico:					
Com serradura	1,34-1,45	35-62	10-32	10-16	150-177
Com mica	1,65-1,92	38-48	16-21	14-16	120-150
Com fibra vidro	1,69-1,95	35-124	16-960	6-16	177-288
Poliéster:					
Com fibra de vidros SMC	1,7-2,1	55-138	427-1174	13-16	150-177
Com fibra de vidro BMC	1,7-2,3	28-70	800-854	12-17	150-177

<b>Melamina:</b>					
Com celulose	1,45-1,52	35-62	10-21	14-16	120
Com fibra de lã/algodão	1,50-1,55	48-62	21-26	12-13	120
Com fibra de vidro	1,8-2,0	35-70	32-960	7-12	150-200
Ureia com celulose	1,47-1,52	38-90	10-21	12-16	77
<b>Alquilamida:</b>					
Com fibra de vidro	2,12-2,15	28-65	32-534	14-18	230
Com fibra mineral	1,60-2,30	20-62	16-26	14-18	150-230
<b>Epoxidoca (bisfenol A):</b>					
Sem material de enchimento	1,06-1,40	28-90	10-533	16-26	120-260
Com fibra mineral	1,6-2,0	35-124	16-21	12-16	150-260
Com fibra de vidro	1,7-2,0	70-210	...	12-16	150-260

## 2.2 Compósitos Matriz Polimérica

Devido às vantagens dos polímeros em relação aos demais materiais, como o seu fácil processamento, baixo custo, alta produtividade e versatilidade, os compósitos de matriz polimérica têm encontrado um grande número de aplicações que vão desde a indústria aeroespacial e automóvel, passando por aplicações militares e na construção civil, até à confecção de material desportivo.

Esta diversidade de aplicações deve-se ao grande número de combinações possíveis, quando se mistura um material de reforço em matrizes poliméricas. Pode afirmar-se que as futuras aplicações de materiais compósitos poliméricos estão exclusivamente limitadas pela criatividade individual e pelo interesse da sociedade.

Os materiais utilizados com agente de reforço na preparação do compósito de matriz polimérica podem ser classificados como reforço à

base de partículas, ou como reforço fibroso, caso de trate de fibras. No primeiro caso pode não ocorrer uma mudança significativa nas propriedades do material final, quando comparado à matriz polimérica.

As partículas actuam mais como um enchimento com a finalidade de diminuir o custo de produção do compósito, do que como material de reforço. Por outro lado, a utilização de um reforço fibroso normalmente promove um aumento significativo na resistência mecânica e rigidez das matrizes poliméricas.

Os compósitos reforçados com materiais fibrosos são normalmente preparados a partir de fibras de alto módulo de elasticidade e resistência mecânica. Em geral, as fibras são os principais membros de solicitação mecânica, enquanto a matriz tem por função manter as fibras na localização e direcção desejadas, agindo como um transportador de carga e protegendo as fibras de danos ambientais, decorrentes por exemplo de altas temperaturas, humidade e de agentes químicos.

O avanço da indústria química proporcionou o desenvolvimento e produção em larga escala das chamadas fibras avançadas ou de alto desempenho, como as fibras de carbono. Estas fibras, juntamente com as fibras de vidro, passaram a ser utilizadas como agentes de reforço em compósitos poliméricos, dando origem a uma nova classe de materiais, designada como Materiais Compósitos Avançados.

Apesar das suas inúmeras vantagens, as fibras sintéticas apresentam alguns inconvenientes. Estas fibras podem causar diversos problemas de saúde, tais como irritações na pele e nos sistemas respiratório. Outra das desvantagens reside no facto de serem extremamente abrasivas, produzindo um elevado desgaste nos equipamentos durante o processamento. No que se refere às questões ambientais, as fibras sintéticas podem ser consideradas como uma ameaça para o meio ambiente, uma vez que apresentam baixa velocidade

de degradação e são produzidas a partir de matéria-prima oriunda de fontes não renováveis.

Dentro deste contexto, os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais têm suscitado um grande interesse nos últimos anos. Estes materiais que podem ser obtidos a partir de fontes renováveis, são biodegradáveis, apresentam baixo custo, possuem baixa densidade específica, logo são excelentes candidatos a substituir os tradicionais compósitos poliméricos reforçados com fibras sintéticas.

Vários investigadores têm procurado alternativas, utilizando um conjunto variado de fibras naturais e de materiais poliméricos, de forma a poder substituir da forma mais eficiente as fibras naturais pelas sintéticas (Fernandez, 2005).

Joshi *et al* (2003) compararam as fibras naturais com as fibras de vidro em termos de impacto ambiental. Para o estudo foram analisar vários casos práticos desenvolvidos na indústria, onde compararam parâmetros tais como a energia total necessária para o processamento dos compósitos, a emissão de gases para a atmosfera e a libertação de elementos poluentes na água (tabela 10).

Tabela 10. Comparação entre um termoplástico e um compósito de matriz termoendurecível reforçado com fibras naturais

Component material	ABS Copolymer	Hemp-Epoxy
Environmental indicator		
Total energy (MJ)	132	73
CO <sub>2</sub> emissions (kg)	4.97	4.19
Methane (g)	17.43	16.96
SO <sub>2</sub> (g)	17.54	10.70
NO <sub>x</sub> (g)	14.14	18.64
CO (g)	4.44	2.14
Phosphate emissions to water (g)	0	0.09
Nitrate emissions to water (g)	0.08	12.05

Com o trabalho desenvolvido foi possível chegar à conclusão de que, nos casos analisados, as fibras naturais são ambientalmente superiores às fibras de vidro. As principais razões são as seguintes:

- A produção de fibras naturais resultam num baixo impacto ambiental, quando comparadas com a produção das fibras de vidro;
- Os compósitos reforçados com fibras naturais apresentam percentagens de fibras superiores aos teores de polímero, o que contribui para uma diminuição do custo.

Mueller (2004) também estudou diversas fibras naturais e métodos de processamento para reforçar painéis para aplicação na indústria automóvel. O estudo descreve o efeito de vários parâmetros associados às fibras tais como a granulometria das fibras.

Martins *et al* (2004) caracterizaram mecânica e termicamente compósitos com matriz de Policloreto de Vinil, com diferentes sistemas de plastificação, reforçados com fibras de Sisal.

Os compósitos de fibras curtas, aleatoriamente distribuídas, foram caracterizadas através de ensaios mecânicos de resistência à tracção, microscopia electrónica de varredura (MEV), análise térmica de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise por termogravimetria (TG). Para a realização dos ensaios utilizaram várias granulometrias, 3, 6 e 10 mm, tendo os melhores resultados sido obtidos com as fibras de 6 mm.

Nas condições estudadas, a substituição de um plastificante líquido (do tipo poliéster) por um plastificante sólido (copolímero Estileno / vinil acetato / monóxido de carbono) na resina de PVC, mostrou ser perfeitamente viável com um melhor desempenho dos compósitos com sisal em relação à resistência à tracção, alongamento e módulo de elasticidade.



---

### 2.3 Fibras de Madeira para Reforço de Compósitos poliméricos

Além da heterogeneidade na estrutura e composição química acima mencionadas, as fibras naturais apresentam restrições quanto às condições de processamento. Por serem naturais, o tratamento térmico normalmente imposto às fibras durante a etapa de processamento e cura dos compósitos provoca mudanças físicas e químicas. Esta análise tem uma especial importância, uma vez que uma das principais desvantagem da aplicação de materiais compósitos reforçados com fibras naturais é a baixa temperatura de degradação da celulose, que varia entre 180 e 220° C, conforme o tipo e % de celulose.

A degradação térmica das fibras liberta voláteis, provoca descoloração, aparecimento de odor e causa a deterioração das propriedades mecânicas, afectando a resistência final do compósito. Esta degradação resulta também na libertação de gases durante o processamento, quando a temperatura atinge valores acima de 200°C, o que pode criar alta porosidade e baixa densidade, comprometendo o desempenho mecânico do compósito final (Correa *et al*, 2003).

De entre as desvantagens das fibras naturais, tais como as fibras de madeira, talvez a principal seja a sua natureza hidrofílica. Devido ao alto teor de polissacarídeos (hemicelulose e celulose), as fibras naturais apresentam alta higroscopicidade em relação às fibras sintéticas. Este carácter hidrofílico tem limitado a sua aplicação como agente de reforço, principalmente em matrizes poliméricas hidrofóbicas, devido à falta de compatibilidade entre os componentes do compósito. Esta falta de compatibilidade leva à obtenção de materiais com baixa adesão fibra-matriz. A estrutura e natureza da interface fibra-matriz desempenham um papel importante nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos, pois é por meio dela que ocorre a transferência de carga da matriz para a fibra.

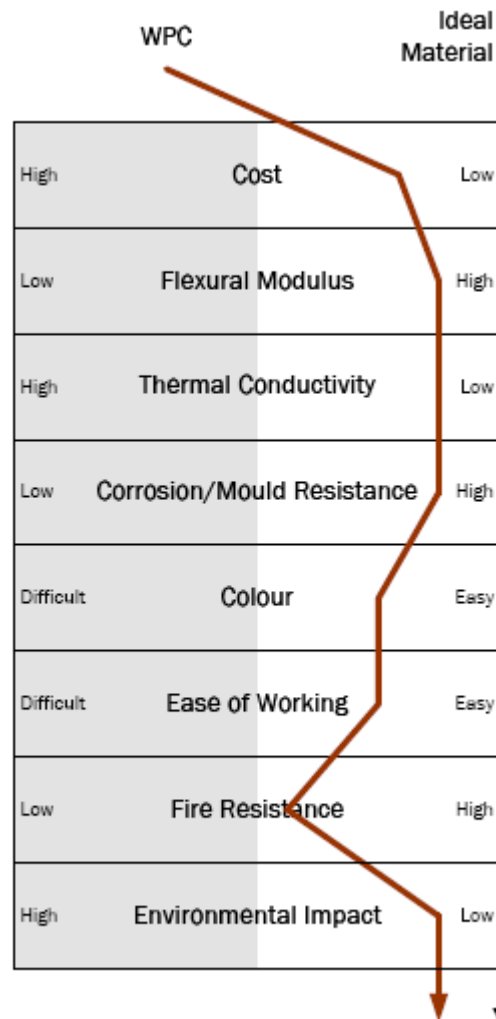


Figura 14. Características dos plásticos reforçados com fibras de madeira

As fibras de madeira estão a ser cada vez mais utilizadas na indústria para reforçar compósitos poliméricos. Na figura 14 podem-se observar as propriedades dos materiais compósitos processados com fibra de madeira. As resinas mais utilizadas para a matriz são as termoplásticas, tais como polipropileno, poliestireno e o PVC. As resinas termoendurecíveis são também uma excelente alternativa aos termoplásticos, principalmente devido ao fácil acesso à matéria-prima e à possibilidade de utilização de formas simples para efectuar a moldação (Teixeira e César, 2006).

---

Na literatura podem encontrar-se vários trabalhos que envolvem materiais compósitos reforçados com fibras de madeira, como por exemplo termoplásticos (polietileno, polipropileno), termoendurecíveis (poliéster, epoxy e resinas fenólicas), etc.

Correa *et al* (2003) estudou a reactividade o polipropileno modificado com anidrido maleico (PP – MAH) utilizado como compatibilizante em compósitos termoplásticos de polipropileno e farinha de madeira. A influência da carga celulósica e a eficiência do compatibilizante nas propriedades reológicas, térmicas, mecânicas e morfológicas do sistema foram avaliadas através da medição da rigidez, grau de cristalinidade, temperatura de cristalização e fusão cristalina, tendo em conta as características da resina, a distribuição granulométrica e o teor de humidade da farinha de madeira. Como principais conclusões podemos referir que os compósitos compatibilizados com PP-MAH apresentam ganhos significativos de rigidez em relação aos compósitos não modificados, independentemente do tipo de farinha de madeira utilizada. As propriedades térmicas do polímero mostram-se sensíveis à distribuição granulométrica, e algumas composições apresentam tendência para escurecerem com a elevação da temperatura de cristalização do polímero, na presença do reforço celulósico.

Hilling *et al* (2006) estudaram o efeito de diferentes misturas de polietileno de alta densidade (HDPE), HDPE reciclado e fibra de pinho, nas propriedades físico-mecânicas de placas obtidas pelo método de compressão a quente. As misturas foram realizadas com um misturador tipo Drais, sem controlo da temperatura e moldadas por compressão através de uma prensa hidráulica a 150 °C.

Os provetes obtidos foram analisados através dos ensaios de tracção, flexão, impacto e dureza.

---

Podemos ainda referir que, neste estudo, não houve diferença significativa nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos confeccionados com HDPE virgem em relação aos confeccionados com HDPE reciclado, excepto na resistência ao impacto na qual o HDPE virgem apresentou maiores valores. Todos os compósitos confeccionados apresentaram boas propriedades físico-mecânicas, atestando a viabilidade da sua aplicação industrial.

Apesar do potencial das fibras naturais para utilização como reforço em materiais compósitos poliméricos, a sua aplicação ainda não é tão efectiva quando comparada com o que acontece com as fibras sintéticas, requerendo ainda um conjunto de estudos para seleccionar as matrizes mais adequadas a utilizar.

#### 2.4 Interface Fibra-Matriz

O desenvolvimento de uma ligação química ou interacção física na região de contacto promove a adesão necessária entre a fibra e a matriz, produzindo compósitos com melhores propriedades. Muitas vezes é necessário melhorar a adesão entre as duas superfícies com utilização de agentes de acoplamento ou modificadores de superfície. Os agentes introduzidos, tanto podem funcionar ao nível da fibra como ao nível da matriz, alterando a estrutura química (Niska e Sanadi, 2008).

A obtenção de uma interface distinta depende da adesão fibra-matriz, e esta adesão pode depender de vários factores ou mecanismos, tais como a interdifusão, a atracção electrostática, a afinidade química, a adesão mecânica, entre outros.

Conforme anteriormente mencionado, a qualidade da interface fibra-matriz é muito importante para se utilizarem fibras naturais para reforço em materiais compósitos. Para melhorar e aumentar esta interface, podem

---

ser utilizados vários procedimentos não esquecendo a vertente económica do processo, uma vez que é mais um custo adicionado ao processo.

Encontram-se na literatura diversos tipos de tratamentos e métodos propostos para modificar superfície das fibras e a composição química da resina utilizada, com o objectivo de intensificar a adesão fibra-matriz. Os mais utilizados são os tratamentos através de soluções aquosas de hidróxido de sódio 10% (NaOH) e hidróxido de Cálcio 10% (Ca (OH)<sub>2</sub>). No entanto existem outros tipo de tratamento com o caso do tratamento com ar ionizado, que pode ser utilizado com o objectivo aumentar a adesão entre a fibra e a matriz (Razera, 2006).

Soluções de bases fortes (NaOH, KOH, Ca (OH)<sub>2</sub>) dissolvem uma quantidade considerável de constituintes da madeira mesmo a temperaturas baixas. Soluções de NaOH são indicadas para remover pentosanas de madeiras folhosas (80%). O tratamento da madeira com NaOH (100%) remove algumas substâncias aromáticas, tais como vanilina, siringilaldeído, etc. A temperaturas mais elevadas (100 – 180 °C) uma maior quantidade de substâncias são dissolvidas (Klock *et al*, 2005).

Bogoeva-Gaceva *et al* (2006) estudou o efeito de diversos tratamentos aplicados às fibras naturais com o objectivo de melhorar a adesão da matriz à fibra. As fibras utilizadas foram as fibras de Kenaf e os tratamentos utilizados foram um tratamento alcalino com solução de Hidróxido de Sódio. Os efeitos destes tratamentos foram posteriormente analisados com microscopia óptica, nomeadamente SEW, FTIR e WAXS.

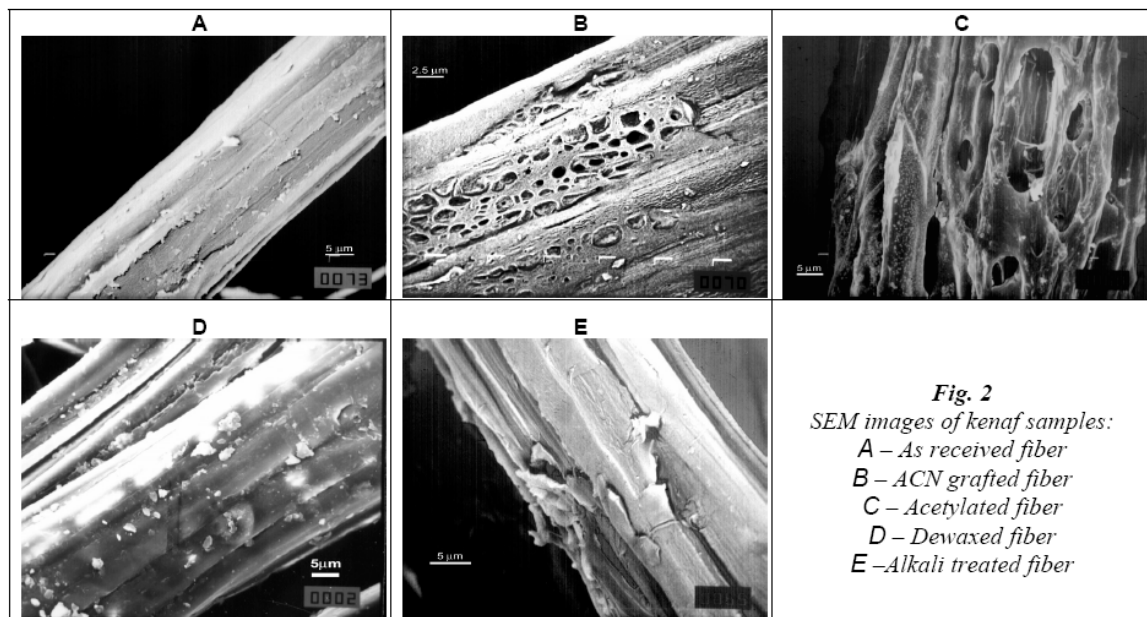


Figura 15. Alterações na superfície da fibra provocadas pelos diversos tratamentos

Neste estudo, Bogoeva-Gaceva *et al* (2006) constataram que os tratamentos aplicados às fibras de Kenaf eram eficientes, produzindo alterações na estrutura das fibras (figura 15). O tratamento de desfibrilização provocou alterações na morfologia da superfície da fibra, e introduziu um elemento químico activo, bem como provocou alterações na estrutura cristalina da celulose. A morfologia da superfície foi sofrendo alterações com a remoção gradual dos constituintes não celulósicos, através do tratamento alcalino.

Paiva *et al* (1999) estudaram a resistência ao impacto de compósitos de matriz termoendurecível fenólica reforçada com fibras naturais com e sem tratamento. As fibras utilizadas foram as fibras de sisal, ananás, e bagaço de cana-de-açúcar. Um tratamento à base de hidróxido de sódio 10% durante 60 minutos foi aplicado às fibras de ananás. Neste estudo os autores verificaram que os compósitos contendo fibras de bagaço e fibras de sisal apresentam menor quantidade de micro vazios em relação às matrizes poliméricas de polímeros termoendurecível fenólicos e lignina-fenol.

Tabela 11. Comparação da resistência ao impacto de vários compósitos reforçados com fibras naturais

Material	Resistência ao Impacto (J/m)
Polímero Termoendurecível	12,8
Compósito Fenólico/Fibra Ananás (NaOH	65,5
Polímero Termoendurecível Lignina-fenol	13.3
Compósito Lignina-fenol/Fibra de Ananás (NaOH)	51.35

Os ensaios de impacto e MEV concluíram que a adesão das fibras de sisal à matriz não foi homogênea em todo o material. Relativamente às fibras de ananás, verificou-se um aumento da resistência ao impacto, ou seja a degradação destas fibras através do tratamento melhorou a interacção da superfície da fibra com a matriz polimérica, facilitando a adesão na interface fibra-matriz (tabela 11).

Santiago (2007) realizou um estudo comparativo sobre diferentes tipos de tratamentos utilizados para modificar a superfície da fibra de coco (tabela 12).

Tabela 12. Comparação de diferentes tratamentos aplicados às fibras naturais

Método de tratamento	Custo estimado	Tempo de tratamento (h)	Observações
Retardante de chama (Mendes, 2002)	Alto	0,5	Melhora a união superficial e aumenta a resistência mecânica
Solução NaOH (Prasard e tal., 1983)	Médio	72	Melhora união superficial e diminui a resistência mecânica
Solução CaOH (Filho e tal., 2000)	Médio	2880	Melhora união superficial e diminui resistência mecânica
Envelhecimento em estufa (Mendes, 2002)	Alto	17280	Melhora união superficial e aumenta a resistência mecânica

Os tratamentos que utilizou foram o tratamento com água quente e o tratamento com detergente em pó aniônico à base de derivados de sódio. Com os tratamentos utilizados verificou-se a eliminação da camada superficial, aumentando a área de contacto pela exposição das fibrilas, que contribui para o aumento da adesão matriz/fibra. Os compósitos com fibras tratadas apresentam uma menor higroscopicidade, uma maior estabilidade dimensional e resistência química. Os resultados comprovam que o tratamento com água quente é simples e eficaz para aplicação em compósitos de engenharia, para além de ser economicamente viável.

Mochnacz *et al* (2002) caracterizaram e modificaram superficialmente as fibras de sisal através da utilização de vários tratamentos para reforço de compósitos poliméricos. A fibra de sisal foi modificada superficialmente através de reacções com soluções aquosas de NaOH 0.25, 0.5, 2.0, 5.0 e 10% p/p e com N-isopropilacrilamida a 1.0, 2.0 e 3.0% p/p. Após os tratamentos, houve um contínuo aumento no índice de cristalinidade das fibras tratadas com NaOH, enquanto a resistência térmica máxima foi para a concentração de 2% p/p. A resistência à tracção das fibras diminuiu continuamente com a severidade do tratamento. O tratamento com N- isopropilacrilamida reduziu a capacidade de absorção de água da fibra de sisal e o índice de cristalinidade das fibras. A concentração de 2% p/p foi a que apresentou uma maior resistência à tracção, de entre todos os tratamentos aplicados.

Tita *et al* (2002), estudou a resistência ao impacto de compósitos de matriz fenólica reforçados com fibras bagaço de cana de açúcar tratadas com ar ionizado, esterificação, e com uma solução aquosa de hidróxido de sódio com várias concentrações. Os métodos de tratamento melhoraram a adesão da fibra à matriz. Apenas as fibras tratadas com ar ionizado apresentaram melhores resultados no ensaio de resistência ao impacto. Em relação à absorção de água, estes autores observaram que os compósitos fenólicos reforçados com fibras tratadas com 8% NaOH



apresentam uma menor absorção de água. Um dos factores que podem ter contribuído para esse facto pode ter sido a extracção da hemicelulose devido ao tratamento com NaOH. A hemicelulose é considerada a principal responsável pela absorção de água por ser mais acessível que as regiões cristalinas da celulose.

## 2.5 Materiais compósitos reforçados com fibras naturais utilizados na construção

A aplicação de materiais compósitos reforçados com fibras de origem natural na construção já não é recente. A madeira e alguns dos seus derivados já são há algum tempo aplicados na construção. De entre os mais utilizados destacam-se o MDF (médium density fibreboard), o OSB (oriented strand board), o MDP (médium density particleboard) os contraplacados e a própria madeira (figura 16).

Todos eles, à excepção da madeira, são produzidos a partir de partículas de madeira e resinas sintéticas. Para além destes, existe ainda um conjunto de novos materiais utilizados na construção que em alternativa às matrizes polimérica utilizam matrizes à base de cimento.

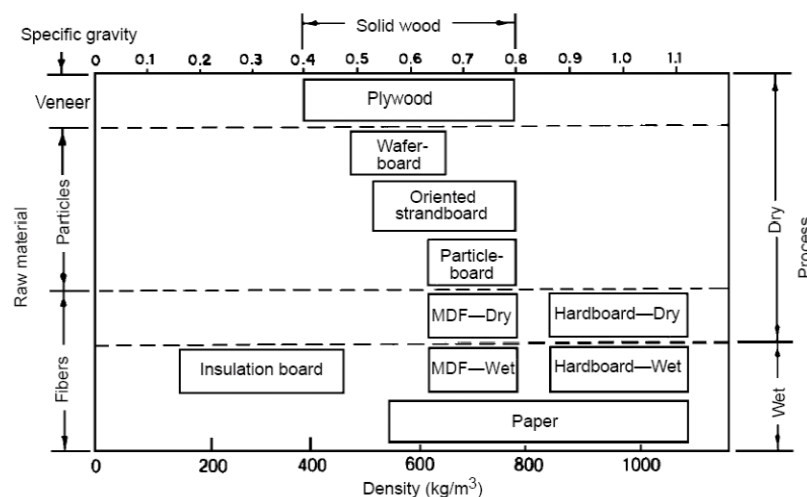


Figura 16. Classificação dos compósitos com madeira, por granulometria, densidade e processo de fabrico (Suchsland and Wooson 1986)

---

### 2.5.1 MDF

Os painéis MDF (Médium Density Fiberboard) são produzidos com fibras celulósicas misturadas com resinas sintéticas que, prensadas a quente pelo processo seco, resultam em painéis com densidades de 500 a 800 kg/m<sup>3</sup>. Esses painéis apresentam vantagens como a reciclagem e renovação da matéria-prima, imobilização do carbono na sua composição e menor necessidade de energia para produção em relação ao aço, plástico, alumínio, etc. (Eleotério, 2000).

Outras vantagens dos painéis de MDF (figura 17) são a elevada relação entre a resistência mecânica e a massa específica, a boa trabalhabilidade, homogeneidade, ausência de defeitos (nós, desvios de grã, medula, etc.). Para a produção de painéis em MDF são utilizados materiais provenientes de desbastes ou resíduos do processamento.

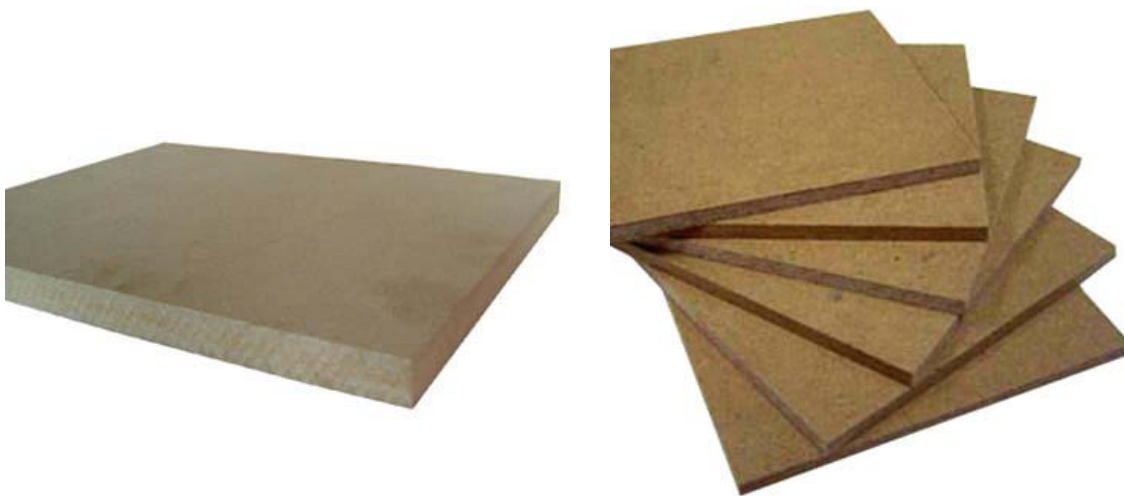


Figura 17. Painéis de MDF utilizados na indústria

Dentre os principais factores que afectam as propriedades físicas e mecânicas dos painéis MDF podem citar-se a sua massa específica ou a densidade. A massa específica dos painéis MDF tem influência positiva sobre os módulos de elasticidade (MOE) e de ruptura (MOR), não há no

---

entanto consenso no que diz respeito ao seu efeito sobre a dilatação, absorção de água e adesão interna. Verifica-se um aumento dos valores das propriedades mecânicas e da estabilidade dimensional dos painéis com o aumento do teor de resina, independente do seu tipo (Eleotério, 2000).

### 2.5.2 Contraplacados

O contraplacado é um painel obtido através da colagem de placas de madeira, geralmente em número ímpar de camadas, sobrepostas com a direcção das fibras das camadas sucessivas formando ângulos rectos entre si, como representado na figura 18.

A direcção ortogonal de uma placa em relação a outra adjacente restringe a movimentação tangencial das camadas e resulta em valores de retractibilidade similares, nas duas direcções do plano da chapa, conferindo ao contraplacado excelente estabilidade dimensional. Além disso o alinhamento cruzado das fibras também proporciona a uniformidade das propriedades mecânicas nas duas direcções do plano da chapa. Essa uniformidade é tanto maior quanto maior é o número de camadas do contraplacado, devido à melhor distribuição das tensões que se desenvolvem em face de determinado carregamento. Outras características importantes são a capacidade de suportar cargas de impacto e a resistência a abertura de fendas. Existem dois tipos básicos de contraplacados, sendo um de uso interno, colado principalmente com resinas à base de uréia-formaldeído e outro de uso externo, em que na maioria das vezes a resina utilizada é de base fenólica (Júnior e Garcia, 2004)

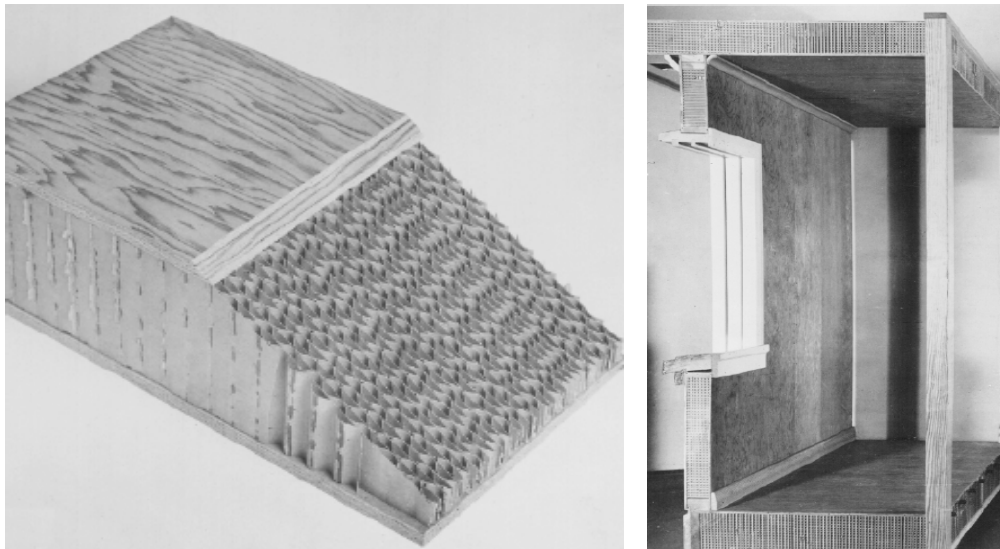


Figura 18. Exemplos da aplicação de painéis contraplacados

A utilização de colas à base de fenol-formaldeído para a fabricação de painéis contraplacados para uso no exterior, deve-se ao facto de serem extremamente resistentes à humidade (Iwakiri *et al*, 2002).

### 2.5.3 Aglomerados / MDP / OSB

O OSB (Oriented Strand Board) é um painel de partículas de madeira orientadas, finas e longas “strands”, agregadas pelo uso de resinas, calor e pressão. A resina mais utilizada na produção do OSB é a fenólica, no entanto o uso da resina de isocianato tem vindo a crescer dia para dia, embora apresentando um custo superior.

Este tipo de painel é tipicamente formado por três camadas, sendo que na camada externa as partículas de madeira são orientadas paralelamente na direcção da formação do painel, na camada interna a orientação é perpendicular. De uma forma geral o OSB é similar ao contraplacado, no que diz respeito à forma de construção, resistência, rigidez à flexão estática e estabilidade dimensional.

Os painéis OSB podem ser obtidos a partir de madeiras provenientes de desbastes e de troncos finos, tortuosos, bem como de espécies de menor valor comercial. Em comparação com os painéis de contraplacado, estes requerem placas de alta qualidade, implicando por isso um custo relativamente superior. A principal aplicação do OSB é na indústria da construção, pois as suas características físicas e mecânicas permitem o uso para fins estruturais. Os painéis OSB concorrem em algumas aplicações com o contraplacado.

O OSB pode expandir-se consideravelmente quando estiver exposto a chuvas ou a condições de alta humidade relativa em longos períodos. Logo só deve ser utilizado em construções protegidas ou no interior (Júnior e Garcia, 2004). Na figura 19 apresentam-se alguns tipos de painéis aglomerados utilizados na construção.



Figura 19. Exemplos de painéis OSB, MDP e aglomerados utilizados na construção

#### 2.5.4 Painéis Cimento / Fibras de Madeira

Uma grande variedade de fibras naturais têm sido utilizadas como reforço de matrizes à base de cimento devido à sua capacidade de renovação, baixo custo e baixo consumo de energia para a sua produção.

---

A finalidade de reforçar um material com fibras é a de melhorar as suas propriedades para aplicação em trabalhos de engenharia.

O cimento é um dos materiais de engenharia mais utilizado a nível mundial por apresentar grande facilidade de aplicação, e por possuir excelente resistência à compressão quando endurecido. No entanto estruturalmente é considerado um material frágil, com baixa capacidade de suportar cargas de tracção e baixa capacidade de deformação (Smith, 1998).

Uma maneira eficiente de conferir ao cimento maior resistência à tracção, ao impacto e à fadiga, além de tenacidade e ductilidade, é a adição de fibras à mistura. A melhoria da tenacidade e da ductilidade é conseguida através de um processo de controlo da propagação de fissuras (Caetano *et al*, 2004).

#### 2.5.4.1 Viroc®

O Viroc® é um exemplo de um material compósito constituído basicamente por dois dos principais materiais de construção: cimento e fibras de madeira, mais concretamente fibras de pinho. É fornecido sob a forma de painéis que apresentam tonalidade cinzenta e cujas superfícies são planas e lisas, como pode ser observado na figura 21.

O Viroc® combina a resistência e flexibilidade da madeira com a durabilidade e as qualidades de dureza do cimento. Durante o processo de fabrico do Viroc® a mistura dos dois materiais é fortemente comprimida e seca durante longo período, ficando as partículas de madeira mineralizadas, resultando num painel com uma combinação de propriedades excepcionais, indispensáveis nos requisitos da construção

.

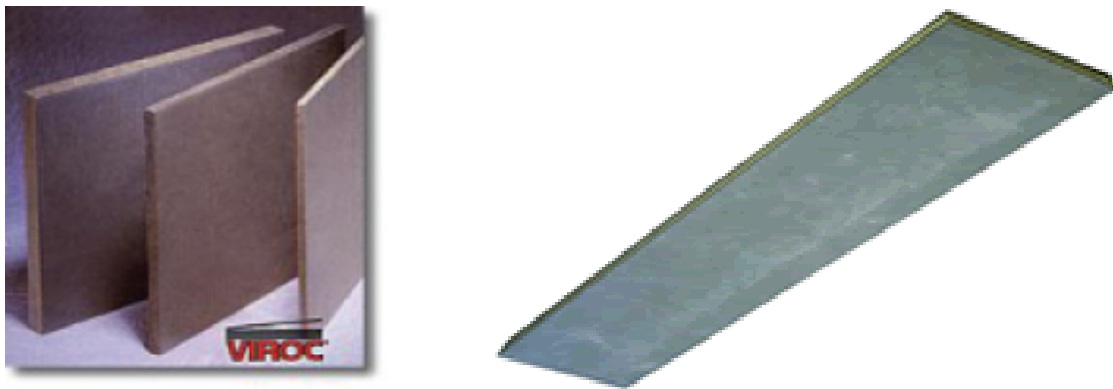


Figura 20. Painel de Viroc®

As excelentes propriedades do Viroc® fazem com que possa ser utilizado tanto no exterior como no interior em variadas aplicações tais como: paredes, pavimentos, tectos ou outras aplicações gerais de painéis.

A integridade estrutural do Viroc® torna-o resistente ao impacto, fácil de utilizar e, resultado da sua massa específica, oferece uma excelente atenuação sonora. Os painéis Viroc® de madeira e cimento não são tóxicos, não contêm compostos voláteis perigosos e são isentos de sílica, asbestos (amiantos) e formaldeído. Não apresentam no entanto quaisquer perigos para a saúde pública nem para o ambiente, são incombustíveis, e sob a acção da água não delaminam mantendo a sua estabilidade dimensional.

O processo de fabrico inicia-se por um destroçamento da madeira em aparas, as quais são misturadas com o cimento nas seguintes proporções (em peso):

- Partículas de madeira resinosa descascada  $\approx 20,7\%$
- Cimento Portland  $\approx 66,7\%$
- Compostos químicos  $\approx 1,9\%$
- Água (varia em função da humidade contida na madeira)  $\approx 10,7\%$

---

#### 2.5.4.2 Icowallpanel®

O Icowallpanel® é um painel composto de miolo de madeira maciça, laminada ou sarrafeada, contraplacado em ambas as faces por lâminas de madeira e externamente por chapas lisas em CRFS (Cimento Reforçado com Fio Sintético).

O painel é produzido por um processo especial de prensagem dos componentes a alta temperatura (figura 21) de que resulta um produto de características técnicas de comprovada qualidade e resistência.

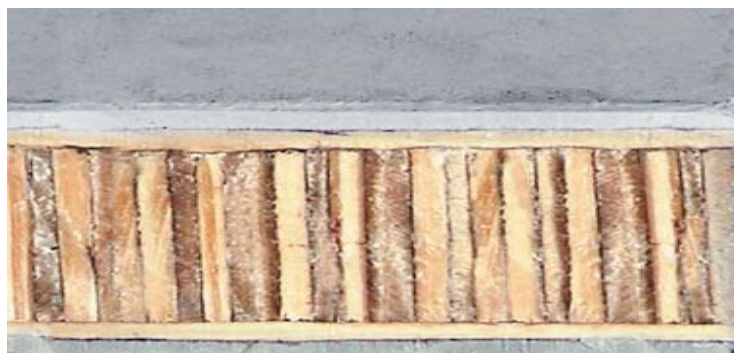


Figura 21. Secção de um painel Icowallpanel®

#### 2.6 Métodos de Processamento

Os principais processos para a produção de componentes produzidos com materiais compósitos de matriz termoplástica, reforçados com fibras naturais, são: extrusão, injeção e compactação que são utilizados para termoplásticos reforçados com mantas de fibras naturais.

Os mais comuns são os processos de mistura e de obtenção dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, a serem realizados em duas etapas. Na primeira etapa faz-se a incorporação das fibras à matriz, seguido de um processo de moldagem do produto final. Diversos tipos de processos podem ser utilizados em ambas as fases, mas segundo Hilling (2006) existe uma tendência, tanto na indústria como no desenvolvimento dos trabalhos científicos, de utilização na extrusão dos



materiais com um extrusora de dupla rosca, seguida da injeção da mistura para obtenção do produto final. O processo inicia-se com a formação do granulado (figura 22), onde as fibras de madeira são adicionadas ao polímero prensado a quente e arrefecido. O sistema utilizado é a extrusão contínua. A percentagem de material utilizado na mistura é variável. As melhores proporções devem ser estudadas, mas normalmente emprega-se a relação 50/50 (Clemons, 2002).



Figura 22. Granulado para a obtenção de peças com injeção de termoplásticos

No que diz respeito ao processamento de materiais termoendurecíveis com fibras naturais, como é o caso deste trabalho, os métodos mais utilizados são a compactação a quente ou a frio.

#### 2.6.1 Fabricação por Compactação

Os compósitos à base de matrizes termoendurecíveis podem ser compactados a frio utilizando moldes fechados a baixa pressão, como pode ser observado na figura 23, sendo este o melhor processo de fabricação do ponto de vista ecológico, segundo o conceito descrito por Kiperstok (1999). De acordo com os fabricantes de peças de fibra de vidro, é uma alternativa mais económica em relação a processos mais complexos, tais como a compactação a quente ou aos sistemas de transferência de resina (Owens Corning, 2001). Coloca-se a resina e o reforço pré-misturados ou não dentro do molde, em seguida fecha-se o molde abrindo-o após a polimerização da resina. O tempo de

polimerização e os ciclos de produção dependem das especificações do fabricante.

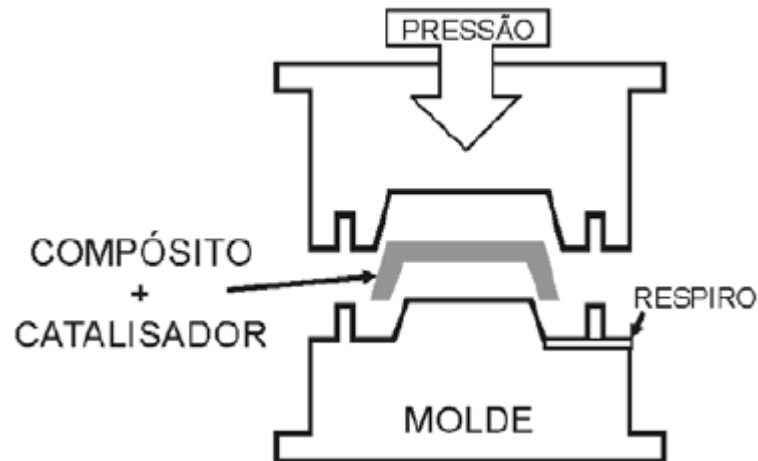


Figura 23. Esquema de fabrico de peças por compactação a frio

Este tipo de moldagem reúne as seguintes vantagens:

- Equipamentos e moldes simples e económicos, podendo ser construídos com plástico reforçado ou outros materiais de fácil manipulação;
- Processo de fecho com prensas leves, a vácuo ou por sistema mecânico;
- Permite moldar peças pequenas e complexas;
- Acabamento superficial em ambas as faces do produto;
- Controle da espessura das paredes do produto;
- Baixa emissão de gases ou vapores;
- Maior controlo do volume de material, diminuição de rebarbas;
- Baixo ou nenhum consumo de energia térmica ou eléctrica;
- Baixo ou nenhum consumo de água;

Outro processo utilizado no fabrico de materiais compósito é a compactação por pressão a quente recorrendo ao equipamento abaixo indicado (figura 24).

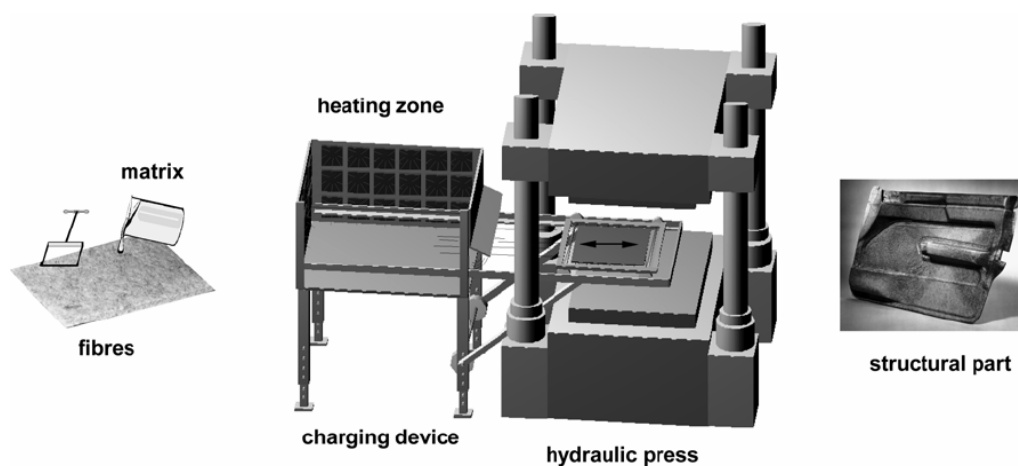


Figura 24. Esquema de fabrico de peças por compactação a quente (Riedle, 1999)

### 3. Materiais, Técnicas e Procedimentos Experimentais

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Fibras

As fibras utilizadas neste trabalho, são provenientes da indústria transformadora de madeira. Os tipos de fibra seleccionados foram: fibras de pinho e faia. Estas pertencem naturalmente a classes diferentes de madeira, com diferentes propriedades. A escolha destas fibras teve em conta o facto de serem das árvores com maior predominância no nosso país.

##### 3.1.2 Resina e Catalisador

A resina epoxídica utilizada é produzida pela SICOMIN, com a referência SR 1500 e pertence à classe dos materiais poliméricos termoendurecíveis. O catalisador utilizado é também produzido pela SICOMIN, com a referência SD 2505, sendo classificado com um catalisador da acção lenta. O tempo de cura médio desta resina é de aproximadamente oito horas.

---

## 3.2 Técnicas e Procedimentos Experimentais

### 3.2.1 Preparação das Fibras

As fibras antes de serem processadas foram sujeitas a um ciclo de várias fases de tratamento. Este ciclo teve início com a moagem das fibras, por forma a obter fibras com o mesmo comprimento de modo a processar uma placa de matriz termoendurecível com propriedades mais homogêneas. O equipamento utilizado para a moagem das fibras foi um moinho de lâminas. Na figura 25 pode-se observar as fibras antes do processo de moagem.



Figura 25. Aspecto inicial das fibras obtidas para a realização dos provetes

Após a etapa de moagem, foi efectuado a separação por diferentes tamanhos. A classificação dos resíduos foi realizada com base em diferentes peneiros segundo a norma ASTM. As aberturas de malha consideradas foram (em mm): 4, 3.80, 3, 2.80, 2.40, 1.70, 1.40, 1.18, 1.00, 0.85. Este sistema de classificação dos resíduos possui um sistema mecânico de vibração (figura 26). O tempo considerado para todos os materiais foi de 120 segundos. O resultado da operação de peneiração indicou que o resíduo de madeira é composto naturalmente, por partículas de diversos tamanhos, que vão desde um pó fino até partículas de média dimensão.



Figura 26. Fibras após operação de separação

O tamanho das fibras tem, como já referido no capítulo 2 influência nas propriedades do material compósito.

Neste trabalho foram consideradas duas granulometrias , 1.0 e 1.4 mm, para o processamento das placas de material compósito de matriz polimérica termoendurecível. Após a operação de moagem e antes das fibras serem misturadas com a resina, foram secas numa estufa a 80° C, durante um período de 2 horas.

### 3.2.2 Preparação da Matriz Termoendurecível Epoxídica

Na preparação da matriz termoendurecível foi utilizado um recipiente de mistura e uma balança digital, onde foram adicionados a resina e o catalisador em peso. A relação de mistura foi de 33% para o endurecedor para 100g de resina. Em seguida a mistura foi homogeneizada com recurso a um sistema mecânico.

### 3.2.3 Processamento dos materiais compósitos

Após a adição do agente de cura, a resina foi colocada no compartimento de mistura mostrado na figura 27. As fibras foram colocadas de forma dispersa no misturador. A relação entre fibra e resina utilizada para a realização das placas, foi de 50 % em peso (fracção mássica).



Figura 27. Sistema de mistura utilizado para a obtenção do compósito

O tempo de mistura fibra/resina teve a duração 20 minutos, à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C), com recurso a um sistema mecânico até à sua mistura homogeneização.

Em seguida, a mistura foi vazada num molde metálico, previamente revestido com anti-desmoldante (tipo de anti-desmoldante + marca), e compactado a frio, conforme se pode observar na figura 28.

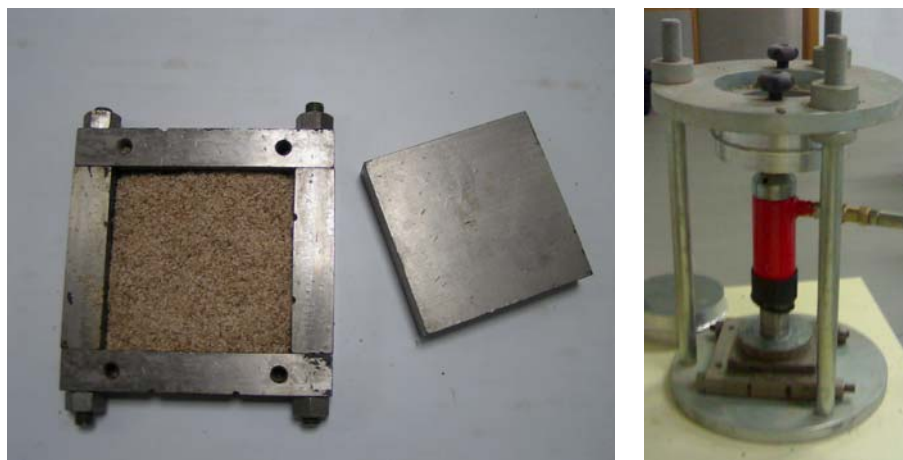


Figura 28. Molde e sistema de compactação utilizado

De modo a poder estudar o efeito da pressão de compactação nas propriedades mecânicas do compósito, foram realizados ensaios com dois valores de compactação. Os valores de pressão utilizados foram,  $0.3 \text{ MN/m}^2$  e  $0.6 \text{ MN/m}^2$ .

As condições ótimas para a preparação dos compósitos foram determinadas após vários testes laboratoriais em que foram variados vários parâmetros, tais como o tipo de molde, tipo de compactação, tempo de impregnação e de mistura e velocidade de rotação. As condições ideais estabelecidas após os testes foram: mistura durante 20 minutos, sendo que o intervalo de tempo foi dividido em duas etapas. Nos primeiros 10 minutos a rotação do elemento de mistura foi de 100 rpm e nos 10 minutos finais a rotação foi de 200 rpm.

Encontradas as condições ótimas os compósitos reforçados com fibras naturais foram preparados segundo estas condições pré-determinadas.



Figura 29. Placas obtidas através da compactação a frio

Foram optimizadas as condições de processamento destes materiais. Os parâmetros considerados para este processo foram: tipo de



compactação, tempo de mistura e velocidade de rotação do sistema mecânico de homogeneização. As condições resultantes desta análise de otimização foram a mistura durante 20 minutos, sendo este intervalo dividido em duas etapas: nos primeiros 10 minutos a rotação do sistema mecânico foi de 100 rpm e nos 10 minutos finais a rotação foi de 200 rpm e compactação mecânica com um sistema hidráulico.

As placas de material compósito com fibras naturais foram todas processadas segundo estes parâmetros (figura 29).

Após a desmoldação a placa processada do molde foi necessário proceder ao corte de modo a obter os provetes para a realização dos ensaios de flexão e de absorção de água (figura 30). Os provetes utilizados para a realização dos ensaios experimentais têm uma dimensão de 48 mm x 12 mm x 6 mm. As propriedades a determinar são a resistência mecânica e o módulo de elasticidade em ensaios estáticos.

Para a realização do ensaio de flexão alguns provetes foram mergulhados em água destilada à temperatura ambiente, durante 7 semanas de modo a podermos estudar a degradação do material. Posteriormente foram retirados semanalmente até perfazer as 7 semanas. Nestes ensaios foram obtidos os valores da resistência mecânica e módulo de elasticidade.

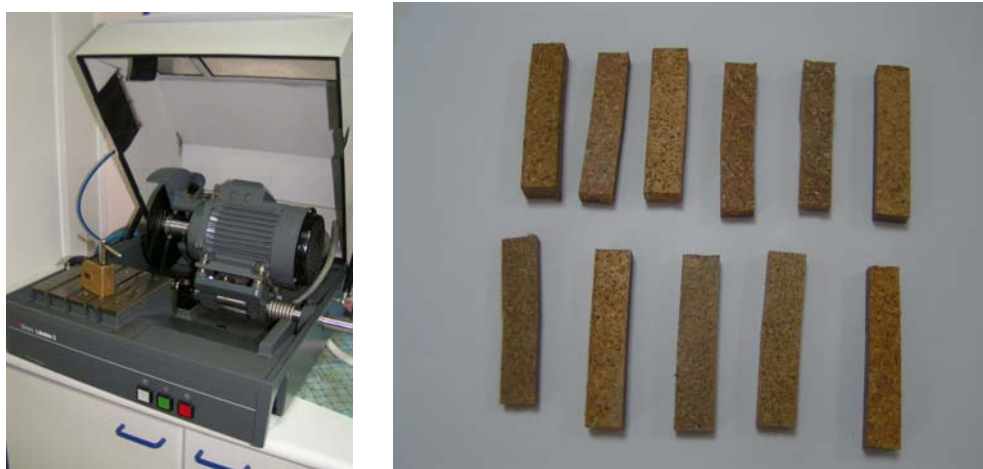


Figura 30. Provetes obtidos para a realização do ensaio de flexão

### 3.3 Tratamentos das Fibras

No processamento destes materiais, foram também utilizadas fibras tratadas. As fibras foram submetidas a um tratamento com uma solução aquosa de hidróxido de sódio 10%. Na literatura vários são os tratamentos que se podem utilizar, sendo o tratamento com solução aquosa de hidróxido de sódio 10 %, um dos mais utilizados.

A relação de solução aquosa para a quantidade de fibra foi de aproximadamente 500 ml de solução aquosa para 50 g de fibra. Após ter sido adicionada a fibra à solução aquosa, a mistura foi colocada numa estufa a 70 °C durante 8 horas. Em seguida as fibras foram lavadas com água destilada e secas em estufa ventilada a 50 °C durante 48, até ser retirada toda a humidade.



Figura 31. Tratamentos das fibras de faia e pinho com solução aquosa de hidróxido de sódio 10%

Pode-se verificar a partir da figura 31, que a fibra de pinho absorveu mais solução aquosa que a fibra nas mesmas condições.

### 3.4 Caracterização das Fibras

---

### 3.4.1 Composição Química

A composição química das fibras naturais pode variar de acordo com o tipo de solo, condições climáticas, entre outros factores, como verificado no Capítulo 2. No que se refere às fibras de madeiras, a composição química varia ainda conforme o tipo de madeira, bem como a região geográfica.

Com o objectivo de avaliar a composição química das fibras de madeira utilizadas, bem com a influência do tratamento utilizado nestas composições, as fibras tratadas e não tratadas foram caracterizadas segundo teor de humidade, teor de cinzas e teor de componentes químicos maioritários, tais como a percentagem de carbono, hidrogénio e azoto.

### 3.4.2 Determinação do teor de Humidade

A madeira é um material higroscópico e consequentemente a relação água - madeira é muito importante, pois influencia as propriedades.

O procedimento utilizado da determinação do teor de humidade foi o seguinte: num recipiente previamente pesado, foi adicionado 1,0 g de fibra, sendo posteriormente colocado numa estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  durante aproximadamente 4 h. De seguida a amostra foi pesada, até atingir um valor constante. O teor de humidade foi determinado pela seguinte expressão (equação 1):

$$\%Humidade = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

em que:

%Humidade = quantidade de humidade relativa da amostra em percentagem de massa

$m_1$  = massa (g) de amostra húmida

---

$m_2$  = massa (g) de amostra seca

### 3.4.3 Determinação do teor de Cinzas

A determinação do teor de cinzas tem como objectivo a determinação da percentagem de produtos inorgânicos inerentes aos diferentes tipos de fibras de madeira utilizadas, no processamento das placas de material compósito com diferentes tipos de fibra.

Para a determinação do material inorgânico (cinzas), utilizou-se cadinhos previamente pesados a 800°C. Foi colocado 1,0 g de amostra no cadinho, sendo de seguida aquecidos usando um bico de Bunsen, promovendo então a combustão lenta da amostra, até à inexistência de chama no interior do cadinho. Posteriormente, colocou-se os cadinhos na mufla a 800°C durante 4 h. As amostras calcinadas foram pesadas até obter um valor constante. O teor de cinzas foi determinado pela seguinte expressão (equação 2):

$$\%Cinzas = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

em que:

$\%Cinzas$  = percentagem de cinzas na amostra

$m_1$  = massa (g) de cinzas

$m_2$  = massa (g) de amostra seca

### 3.4.4 Difracção de Raio – X

A difracção de Raio – X permite obter informação sobre as características da estrutura de um composto. Essa informação é gerada

pelo fenómeno físico da difracção e pela interferência, ou seja, quando os raios incidem sobre um cristal, ocorre a penetração do raio na rede cristalina, a partir desse momento temos várias difracções e interferências construtivas e destrutivas. Os Raios – X interagirão com os electrões da rede cristalina e serão difractados.

Para se analisar a difracção, basta colocar um dispositivo capaz de captar os raios difractados e desenhar a forma da rede cristalina ou estrutura que reflectiu e difractou os Raios – X. (Medeiros, A. Miguel)

As medidas de difracção de Raio - X foram realizadas em difractómetro da marca RIGAKU, modelo RU – 200B utilizando um tubo de cobre de filtro de níquel ( $\text{CuK}_\alpha = 1,5418 \text{ \AA}$ ). As amostras foram colocadas num suporte com as fibras em pó. O índice de cristalinidade foi calculado utilizando-se a equação 3, descrita por Busche-Diller e Zeronian.

$$I_c = 1 - \frac{I_1}{I_2} \quad (3)$$

Sendo que:

$I_c$  = índice de cristalinidade

$I_1$  = intensidade de difracção mínima, referente à região não cristalina

$I_2$  = intensidade de difracção máxima, referente à região cristalina

Os índices de cristalinidade foram obtidos pelos valores de intensidade (eixo y) observados no gráfico de *Intensidade x Ângulo de Difracção* que estão relacionados pela equação 4,

$$\%I_{cr} = 1 - \frac{[I_{22^\circ} - I_{18^\circ}] \times 100}{I_{22^\circ}} \quad (4)$$

---

As principais características que diferem cada forma polimórfica (região cristalina e amorfa) da celulose, macromolécula que confere cristalinidade às fibras lignocelulósicas, são as difracções próximas aos ângulos de Bragg ( $2\theta$ ).

### 3.5 Caracterização dos Compósitos

#### 3.5.1 Ensaio de Flexão

A avaliação da resistência à flexão em materiais compósitos é um factor importante na selecção de materiais, para aplicações em engenharia. A resistência à flexão é dada pela equação 5:

$$\sigma_m = \frac{MY}{I} \quad (5)$$

Com base nos resultados de caracterização mecânica (módulo de elasticidade e resistência mecânica), pretende-se avaliar a influência do tratamento aplicado às fibras, tempo de permanência em água, pressão de processamento e granulometria.

Os ensaios de flexão foram realizados segundo a norma ASTM – D790 M , numa máquina de tracção ZWICK modelo Z – 100, utilizando uma velocidade de deformação de 1 mm/min.

Nas figuras 32 e 33 pode-se observar um esquema e pormenores do ensaio de caracterização mecânica em flexão em três pontos.

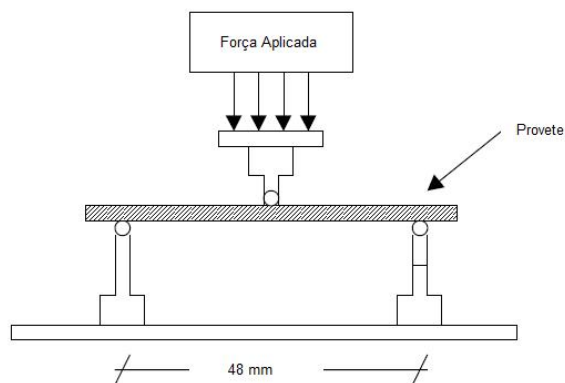


Figura 32. Esquema do ensaio de flexão utilizado

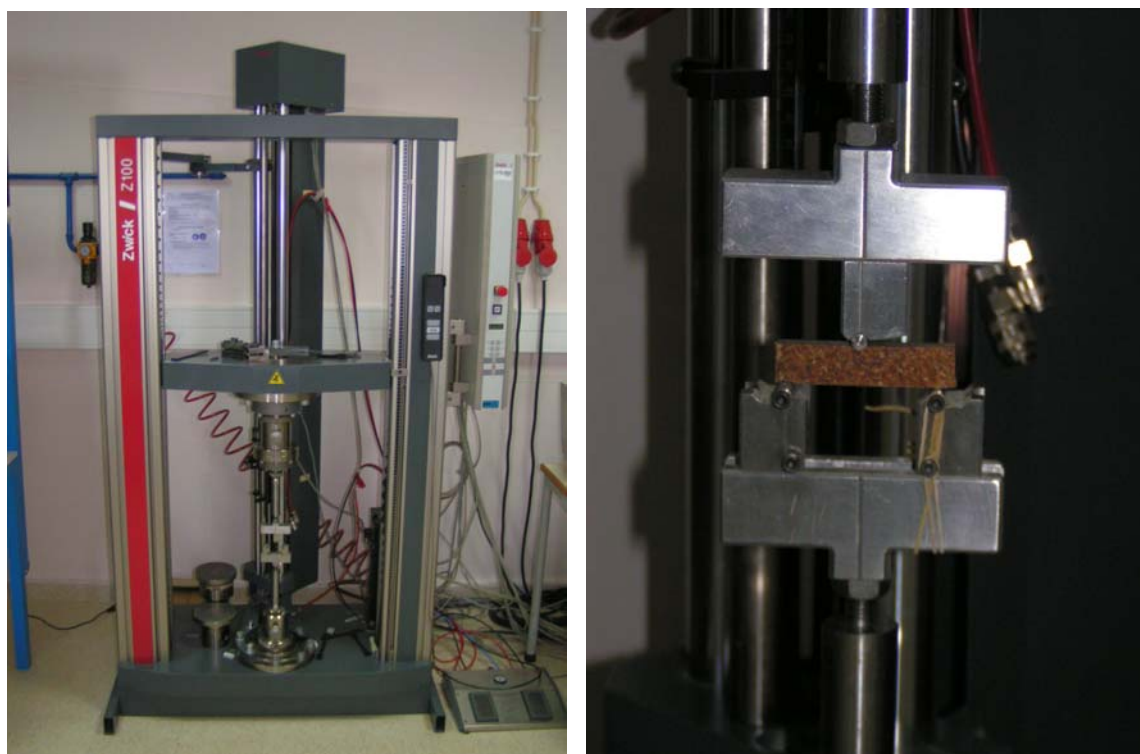


Figura 33. Ensaio de flexão dos provetes

### 3.5.2 Absorção de Água

Os materiais compósitos de matriz polimérica com fibras naturais tem uma tendência natural para absorver água, consequência da natureza

hidrofílica das fibras. Este factor deve-se principalmente às hidroxilas presentes na celulose, hemicelulose e mesmo na lignina.

Considerado que estes materiais podem ser expostos a humidade quando aplicados, sendo que isto pode ocorrer a diferentes temperaturas, torna os ensaios de absorção da água muitos importantes para a determinação das propriedades do compósito.

A absorção de água, dependendo da intensidade com que acontece, pode levar à perda de estabilidade dimensional e modificações nas propriedades mecânicas do compósito.

O modo com os compósitos absorvem água varia em função de vários factores, tais como temperatura, fracção volumétrica das fibras, orientação do reforço, natureza das fibras (isto é, permeável ou impermeável), área superficial de exposição, difusividade de massa e protecção superficial.

A absorção de água nestes materiais é estabelecida principalmente por mecanismos de difusão. Estes mecanismos envolvem a difusão directa de água dentro da matriz e na fibra. Outros mecanismos mais comuns para explicar este fenómeno reside na capilaridade e transporte através das micro fissuras existentes nestes materiais. O mecanismo de capilaridade envolve fluxo de moléculas de água ao longo de interface fibra-matriz, seguido por difusão da interface na matriz e fibras. O transporte de humidade através das micro fissuras envolve tanto o fluxo como armazenamento de água nas micro fissuras ou outras formas de micro fendas geradas durante o processamento do material.

Estudos realizados com materiais compósitos reforçados com fibras naturais, mostram que o modelo de difusão Fickiano pode ser válido para o estudo da difusão de água em materiais compósitos reforçados com fibras naturais. O efeito total observado é consequência destes factores e pode ser discutido considerando o modelo de difusão.



---

O mecanismo de difusão em polímeros vítreos pode ser classificado de acordo com a mobilidade das moléculas que se difundem comparada com a mobilidade de segmentos das cadeias. Neste sentido, três diferentes categorias de difusão podem, ser consideradas.

1. A velocidade de difusão da molécula que penetra no meio é menor que a mobilidade de segmentos de polímero. O equilíbrio no interior do material é rapidamente atingido, sendo mantido, independentemente do tempo transcorrido.

2. A velocidade de difusão da molécula que penetra no meio é maior que a de processos de relaxação dos segmentos poliméricos. Esta difusão é caracterizada pelo desenvolvimento de uma região em que o polímero está intumescido. Esta interface avança, à medida que a água se difunde, diminuindo o volume da região central (vítrea) até que todo o material esteja intumescido.

3. Uma situação anômala (não segue o modelo Fickiano) acontece quando a mobilidade das moléculas que penetram no meio é comparável com as relaxações de segmentos da cadeia polimérica (caso intermédio entre 1 e 2).

A forma da curva de sorção definida pela equação (6) pode ser usada para distinguir se o material tem um comportamento descrito nos itens 1, 2 ou 3.

$$\frac{M_t}{M_\infty} = kt^n \quad (6)$$

$M_t$  é o conteúdo de humidade no tempo  $t$ ,  $M_\infty$  = conteúdo de humidade no equilíbrio e  $k$ ,  $n$  correspondem a constantes.

Se a difusão ocorre segundo o modelo Fickiano (caso 1),  $n = 0.5$ , se ocorre conforme o caso 2,  $n \geq 1$  e para uma difusão anômala (caso 3),  $0.5 \leq n \leq 1$ .

A absorção de humidade em compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais normalmente segue a situação descrita no caso 1 (difusão Fickiana). As características da difusão Fickiana são descritas como: as curvas de absorção são lineares nos estágios iniciais e acima da parte linear.

A equação (6) em escala logarítmica torna-se:

$$\log\left(\frac{M_t}{M_\infty}\right) = \log k + n \log t \quad (7)$$

Substituindo-se os dados experimentais na equação (7) pode-se fazer-se o estudo cinético da difusão para determinar as constantes **k** e **n** a partir da intercepção e da inclinação da parte linear da curva obtida.

Para tempos de ordem de  $M_t/M_\infty \leq 0.5$ , a equação (8) pode ser considerada, a partir da qual o coeficiente de difusão (D), um importante parâmetro do modelo de Fick, pode ser obtido:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{L} \times \left(\frac{D}{\pi}\right)^{0.5} \times t^{0.5} \quad (8)$$

Da inclinação da parte linear da curva de  $\frac{M_t}{M_\infty}$  versus  $\frac{t^{0.5}}{L}$  (sendo L a dimensão da espessura da amostra) obtém-se **D**.

Como a difusão envolve mobilidade de moléculas, a temperatura deve activar o processo. No modelo Fickiano, pode-se considerar que a difusão segue uma relação do tipo Arrhenius (equação 9):

$$D = D_0 \times e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (9)$$

$D_0$  = Índice de permeabilidade,  $E_a$  = Energia de activação do processo de difusão e  $R$  = Constante universal dos Gases. Gráficos de  $\ln D$  versus  $1/T$  (absorção de água avaliada em temperaturas diferentes), permitem obter  $D_0$  e  $E_a$ .

Os testes de absorção de água foram realizados segundo a norma ASTM D570-98. Como esta norma descreve vários tipos de ensaios, escolheu-se determinar a absorção de água por imersão 24 horas. Os resultados deste ensaio reflectiram a capacidade para absorção de água das fibras lignocelulósicas e da matriz polimérica. Os ensaios foram realizados usando provetes sem vedação lateral, de forma a tentar reproduzir as condições mais agressivas que o material poderá encontrar em condições de serviço, no que se refere à absorção de água.

Para a imersão durante 24 horas, as amostras foram previamente colocadas numa estufa a 110 °C durante 2 horas, para de seguida serem pesadas e ser determinado o seu peso seco.

Após essa operação, os provetes foram imersos em água destilada à temperatura ambiente, durante 24 horas. Passadas as 24 horas as amostras foram retiradas da água, secas superficialmente de modo a retirar o excesso de água e pesadas, sendo que os valores do peso de cada amostra, foram retidos de 30 em 30 segundos até um total de 15 minutos.

Por fim foi efectuada a representação gráfica dos pesos obtidos em função do tempo (equação 10).

$$w(\%) = \frac{\text{PesoMolhado} - \text{PesoSeco}}{\text{PesoSeco}} \times 100 \quad (10)$$

### 3.5.3 Determinação da Densidade

Para calcular a densidade dos compósitos obtidos, foi utilizada uma balança digital de precisão *Mettler Toledo AG 204*, com a ajuda de um Kit de medição de densidade, apresentado na figura 34.

Esta medição é feita com base no Princípio de Arquimedes, em que "Todo o corpo mergulhado num fluido em repouso sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo."



Figura 34. Determinação da densidade dos compósitos obtidos

Desta forma, medindo o peso do provete dentro e fora da água destilada (líquido utilizado), a sua densidade é-nos dada pela seguinte equação (12):

$$\rho = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \times \rho_{H_2O} \quad (12)$$

Onde  $M_1$  é a massa do provete fora da água,  $M_2$  a massa do provete dentro da água e  $\rho_{H_2O}$  a densidade da água destilada. A densidade da água

destilada é igual a 1, para uma temperatura de 14°C, pelo que foi necessário medir a temperatura da água utilizada no ensaio para fazer a correcção do valor da densidade. A temperatura medida foi de 20 °C, sendo a densidade correspondente igual a 0,9981.

De seguida os provetes foram pesados na parte de cima do suporte, fora de água e por fim dentro de água, retirando a massa correspondente. O procedimento foi repetido cinco vezes para cada material, sendo o valor final utilizado, a média dos cinco ensaios realizados para cada tipo de material.

## 4. Resultados Experimentais

### 4.1 Determinação da Quantidade de Humidade, Cinzas e Elementos Químicos

As fibras desempenham um papel importante nas propriedades do material compósito. As fibras utilizadas no processamento dos compósitos de matriz epoxídica foram as fibras de pinho e faia.

Nas tabelas 13, 14 e 15 são apresentados os resultados e algumas características destas fibras.

Tabela 13. Propriedades das fibras de faia utilizadas

Resultados Fibra de Faia	
H <sub>2</sub> O [%]	9,3
Cinzas [%]	0,7
Carbono (C) [%]	50,70
Hidrogénio (H) [%]	6,06
Azoto (N) [%]	0,26

Tabela 14. Propriedades das fibras de pinho utilizadas

Resultados Fibra de Pinho	
H <sub>2</sub> O [%]	9,6
Cinzas [%]	0,3
Carbono (C) [%]	52,00
Hidrogénio (H) [%]	6,21
Azoto (N) [%]	0,30

Tabela 15. Propriedades das fibras de pinho tratadas

Resultados Fibra de Pinho com NaOH	
H <sub>2</sub> O [%]	24,00
Cinzas [%]	47,7
Carbono (C) [%]	45,30
Hidrogénio (H) [%]	4,81
Azoto (N) [%]	0,12

#### 4.2 Difracção de Raio – X

Nas tabelas seguintes pode-se observar os valores dos índices de cristalinidade para as fibras de faia, pinho e para as fibras de pinho tratadas com solução aquosa NaOH 10%.

Na literatura pode-se encontrar vários trabalhos em que são utilizadas técnicas de difracção de raio – X para caracterizar as fibras e a eficácia do tratamento aplicado à superfície da fibra . Com base nos resultados de pesquisa do Capítulo 2 e nos resultados obtidos, pode-se concluir que o índice de cristalinidade é superior para fibras tratadas com solução aquosa de NaOH, comparativamente às fibras não tratadas.

Tabela 16. Índice de cristalinidade das fibras de faia

Resultados Fibra de Faia	
X – Ângulo de Difracção	Y – Intensidade
22,174401	13255
18,474326	5643
% I <sub>cr</sub>	
42,6	

Na tabela 16 e nas figuras 35 e 36, são apresentados os valores obtidos para as fibras de faia sem tratamento utilizadas no processamento

dos compósitos. Na tabela 16 pode-se observar os valores máximos e mínimos do ângulo de difracção e de intensidade.

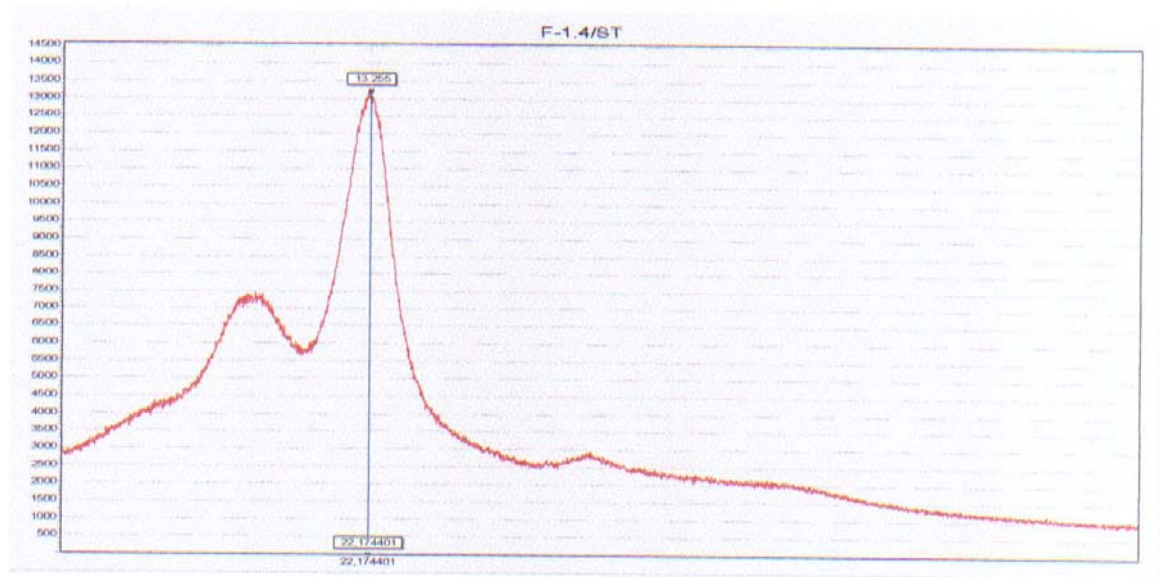


Figura 35. Difracção de Raio – X para a fibra de faia

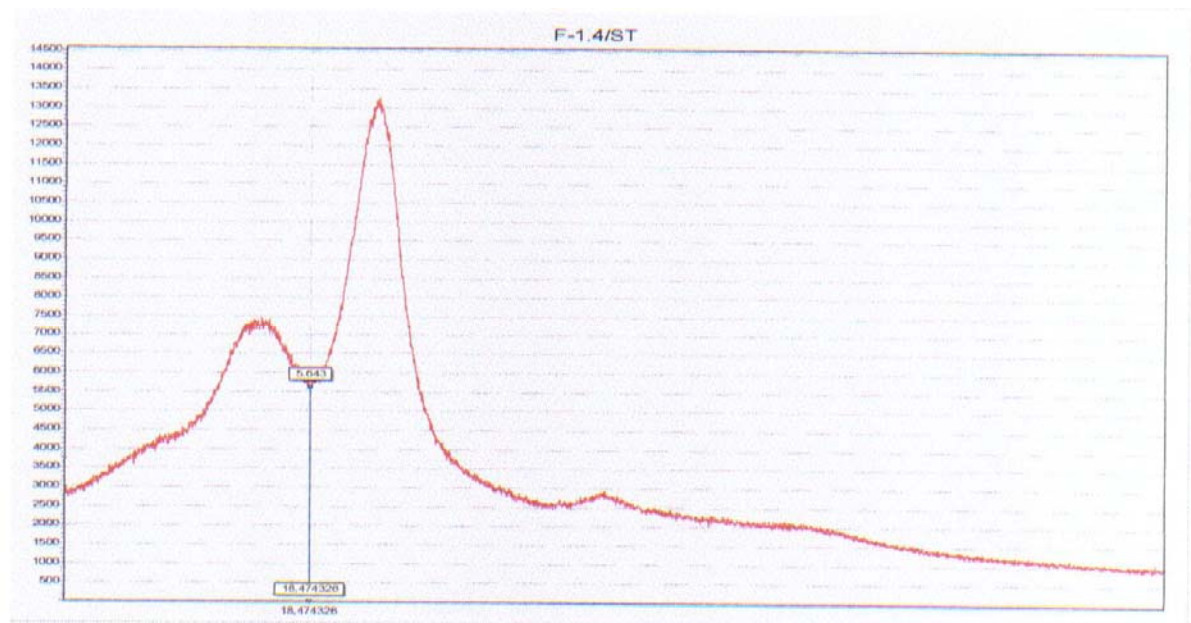


Figura 36. Difracção de Raio – X para a fibra de faia

Na tabela 17 e nas figuras 37 e 38 pode-se observar os valores obtidos para as fibras de pinho sem tratamento. Ao compararmos o valor



do índice de cristalinidade da fibra de faia com a fibra de pinho, verifica-se que o valor relativo à fibra de faia é superior ao da fibra de pinho. Uma das possíveis justificações poderá ser a composição química das fibras, uma vez que a quantidade de celulose influencia directamente o índice de cristalinidade das fibras, com referido no Capítulo 2. [referências]

Tabela 17. Índice de cristalinidade das fibras de pinho

Resultados Fibra de Pinho	
X – Ângulo de Difracção	Y – Intensidade
22,025076	4720
18,0111676	1226
% I <sub>cr</sub>	
26,0	

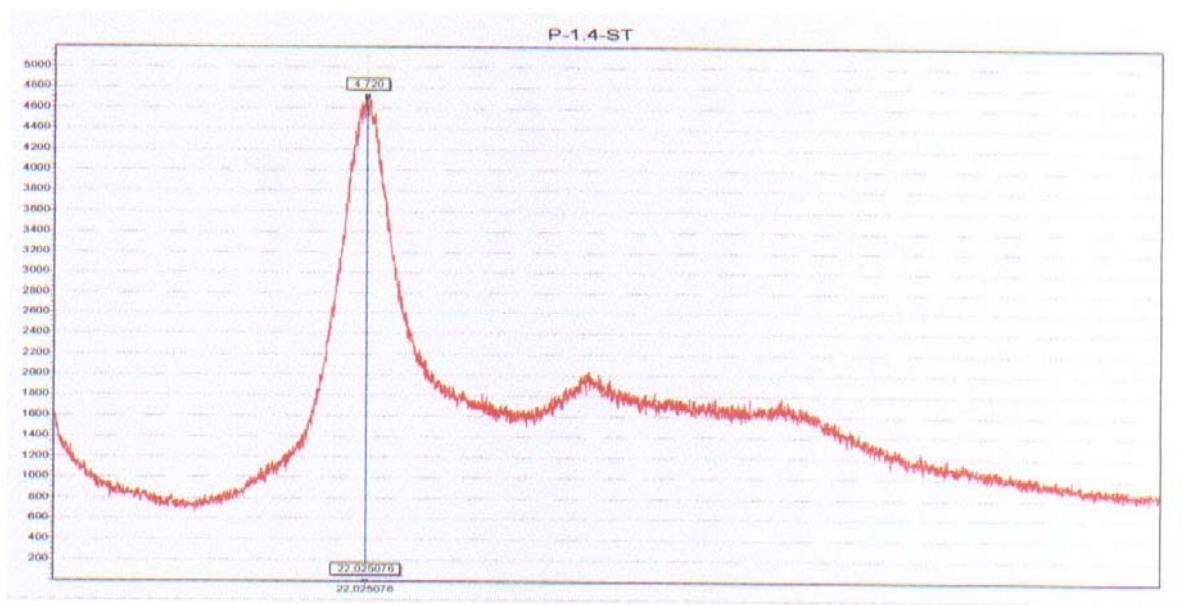


Figura 37. Difracção de Raio – X para a fibra de pinho sem tratamento

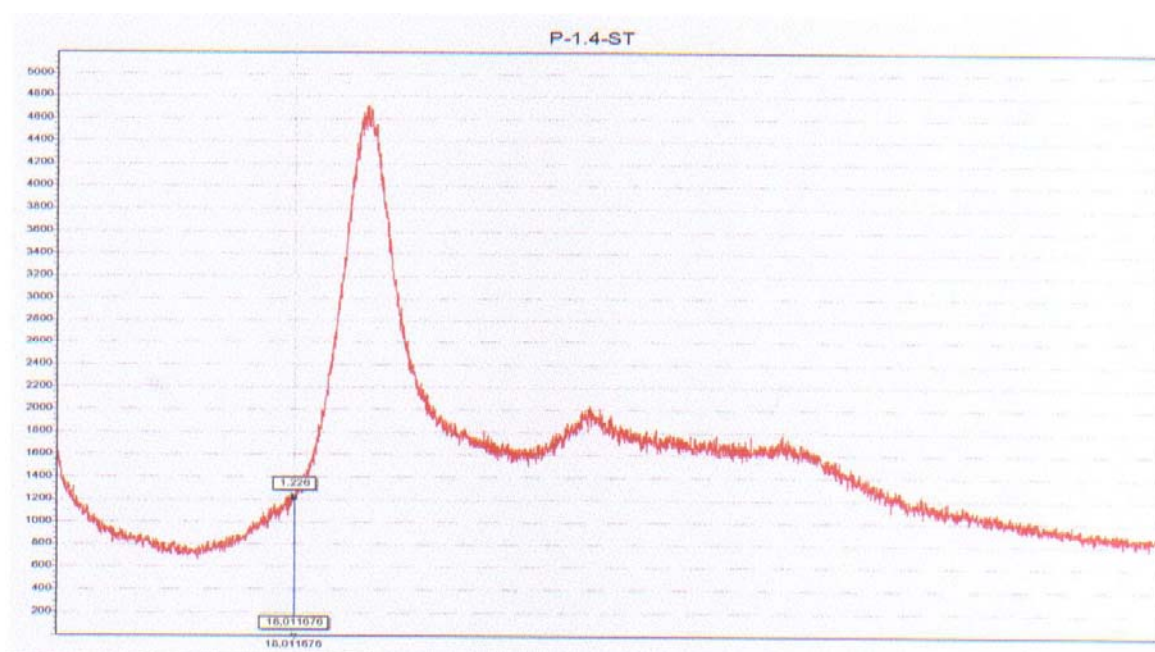


Figura 38. Difracção de Raio – X para a fibra de pinho sem tratamento

Tabela 18. Índice de cristalinidade das fibras de pinho tratadas

Resultados Fibra de Pinho com NaOH	
X – Ângulo de Difracção	Y – Intensidade
21,40229	7362
17,700707	4724
% I <sub>cr</sub>	
64,2	

Na tabela 18 e nas figuras 39 e 40 pode-se observar os valores obtidos para as fibras de pinho com tratamento em solução aquosa de NaOH.

Quando se compara os índices de cristalinidade das fibras de pinho sem tratamento com as fibras de pinho tratadas com solução aquosa de hidróxido de sódio, verifica-se que o valor obtido para as fibras de pinho

tratadas é claramente superior ao obtido para as fibras de pinho não tratadas.

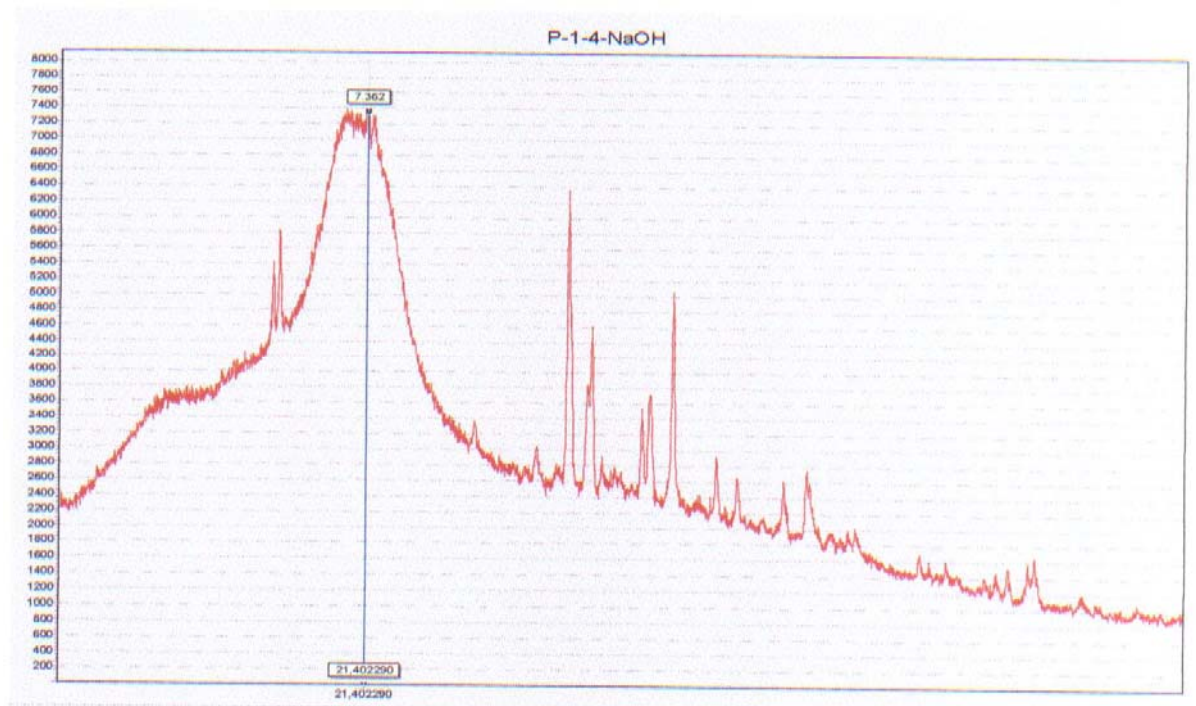


Figura 39. Difrração de Raio – X para a fibra de pinho tratadas com solução aquosa de hidróxido de sódio 10%

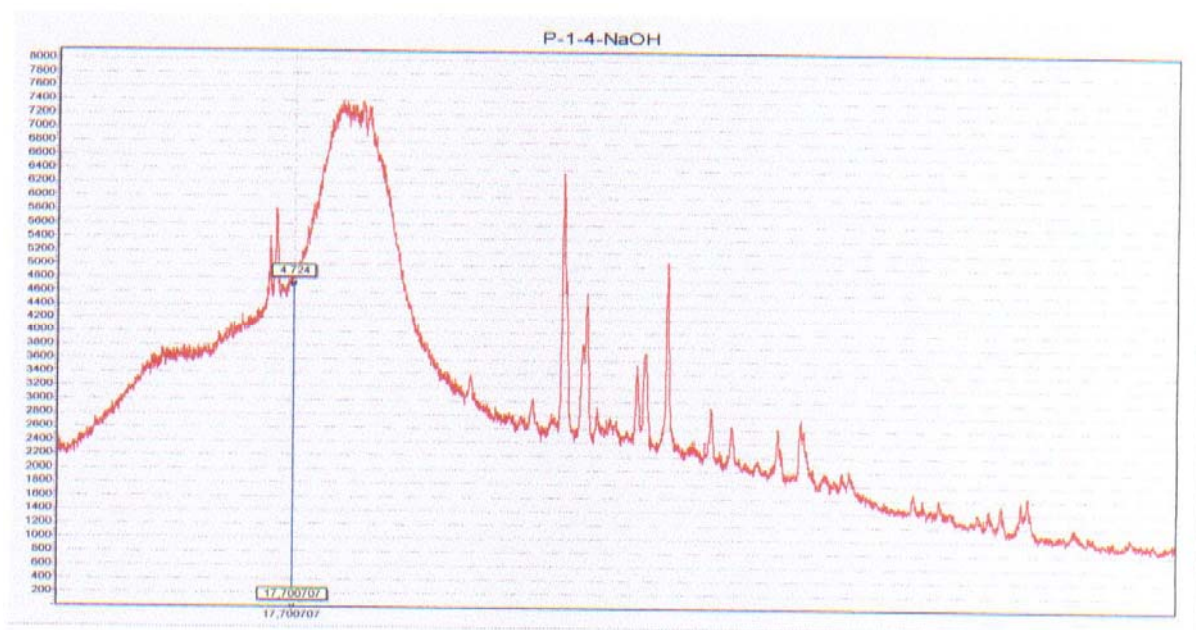


Figura 40. Difrração de Raio – X para a fibra de pinho tratadas com solução aquosa de hidróxido de sódio 10%

---

Como já referido, com base na análise de outros trabalhos no Capítulo 2, que utilizam o mesmo tipo de tratamento e mesma metodologia de análise, verifica-se que com a aplicação do tratamento o índice de cristalinidade tem tendência a aumentar após o tratamento.

Uma possível justificação para isso acontecer reside no facto das hemiceluloses presentes nas fibras naturais, serem sensíveis à acção da solução aquosa de hidróxido de sódio, ocorrendo uma degradação e consequente solubilização das respectivas cadeias. A remoção das macro moléculas de hemicelulose, que se situam na região não cristalina, leva a um aumento do índice de cristalinidade das fibras tratadas com hidróxido de sódio.

#### 4.3 Ensaio de Caracterização Mecânica em Flexão

Com base nos resultados dos ensaio de flexão em três pontos, pode-se analisar, a influência do tipo de fibra, da granulometria, da pressão de processamento do material e do tipo de tratamento, aplicado às fibras.

Na caracterização do comportamento mecânico do material compósito, foram considerados 4 ensaios válidos. Com base nestes ensaios foi calculada a média e o desvio padrão, tanto para a resistência mecânica como para o módulo de elasticidade. Estes resultados são apresentados nas tabelas 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 e 26.

De forma a estudar a degradação dos provetes por acção da água, foram imersos em água quatro provetes de cada tipo de material durante 7 semanas, para posteriormente serem ensaiados. Na figura 41 pode-se observar-se a curva típica de um ensaio de flexão dos materiais processados.

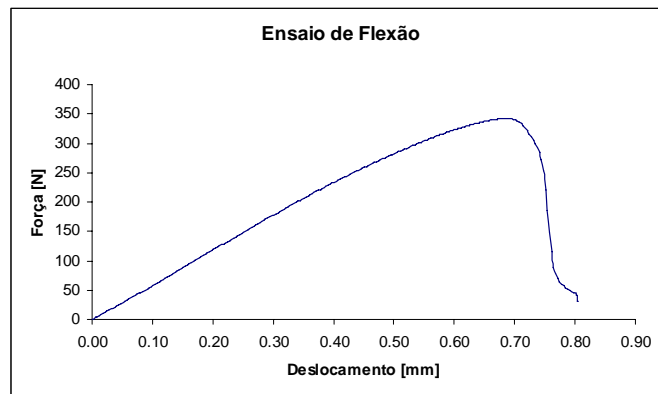


Figura 41. Curva típica do ensaio de flexão em três pontos

#### 4.3.1 Influência do Tipo de Fibra no Comportamento Mecânico dos Materiais Processados

Com o objectivo de analisar a influência do tipo de fibra na resistência mecânica dos compósitos processados, foram comparados os materiais compósitos com fibra de pinho e faia, para os mesmos valores de granulometria, pressão de compactação e tipo de tratamento. Para a codificação dos materiais compósitos processados, foi adoptada a seguinte metodologia. O primeiro dígito diz respeito ao tipo de fibra utilizado, pinho (P) ou faia (F). De seguida, indica-se o tipo de tratamento utilizado, (ST) para materiais sem tratamento e (NaOH) para materiais processados com fibras tratadas em solução aquosa de hidróxido de sódio 10%. Após indicação do tipo de tratamento, refere-se a granulometria utilizada (1,0 ou 1,4 mm). Por último, indica-se qual a pressão de compactação utilizada (0,3 ou 0,6 MN/m<sup>2</sup>). Como exemplo podemos referir a codificação dos materiais processados com fibras de pinho sem tratamento, com uma granulometria de 1,0 mm e com um pressão de compactação de 0,6 MN/m<sup>2</sup>, em que a codificação é representada por PST – 1,0 / 0,6.

Na tabela 19 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas em termos de módulo de elasticidade e resistência mecânica à flexão em três pontos, para os dois tipos de fibra.

Tabela 19. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de faia e pinho sem tratamento com uma granulometria de 1.4 e 0.6 MN/m<sup>2</sup> de pressão de processamento.

E / FST - 1.4 / 0.6					E / PST - 1.4 / 0.6				
A					D				
Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão	Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão
0	72	29,10	2242	870,82	0	93	26,53	2673	162,34
1	55	5,48	1536	80,31	1	45	9,56	1089	181,48
2	54	2,50	1375	76,54	2	40	3,87	1081	15,11
3	49	2,79	1511	8,94	3	43	3,57	1214	112,04
4	51	3,07	1386	89,31	4	41	4,87	1014	120,68
5	51	1,67	1411	152,61	5	44	1,76	1218	79,91
6	55	7,80	1487	313,39	6	45	3,58	1280	124,23
7	51	1,37	1464	100,02	7	46	2,83	1196	172,15

Estes ensaios foram realizados para uma granulometria de 1,4 mm e uma pressão de compactação de 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

Na figura 42 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, com o tempo de permanência em água para os compósitos com fibra de pinho e faia. Estes ensaios foram realizados considerando uma granulometria de 1,4 mm e uma pressão de compactação de 0,6 MN/m<sup>2</sup>, com já referido anteriormente.

Pode-se observar que tanto o módulo como a resistência mecânica, apresentam naturalmente os maiores valores no caso dos materiais não imersos em água. Observa-se claramente uma grande diminuição das propriedades mecânicas durante a primeira semana de permanência em água. Pode-se observar que os compósitos processados com fibra de pinho apresentam uma resistência mecânica superior, quando não imersos em água, relativamente aos materiais compósitos processados com fibra de faia. O mesmo não se verifica para os compósitos com fibra de pinho imersos em água, pois apresentam uma degradação superior aos com fibra de faia, com se pode observar na figura 42.



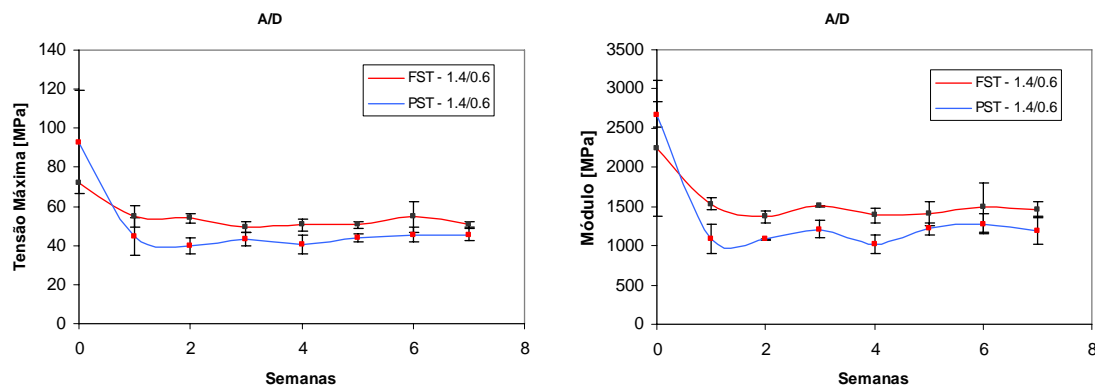


Figura 42. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras, com uma granulometria de 1.4 mm e pressão de fecho do molde de 0.6 MN/m<sup>2</sup>

Na tabela 20 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas em termos de módulo de elasticidade e resistência mecânica à flexão em três pontos, para os dois tipos de fibra. Estes ensaios foram realizados para uma granulometria de 1,4 mm e uma pressão de processamento de 0,3 MN/m<sup>2</sup>, inferior ao valor apresentados na tabela 19.

Tabela 20. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de faia e pinho sem tratamento com uma granulometria de 1.4 e 0.3 MN/m<sup>2</sup> de pressão de processamento.

E / FST - 1.4 / 0.3					E / PST - 1.4 / 0.3				
B					E				
Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão	Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão
0	91	36,21	2836	260,01	0	109	6,16	3048	319,10
1	40	7,11	1204	138,23	1	37	12,21	1019	282,90
2	42	4,40	1288	85,00	2	27	6,73	813	205,30
3	40	9,87	1048	195,85	3	36	4,33	972	127,20
4	32	5,39	860	200,29	4	29	4,29	873	47,41
5	32	12,66	681	321,88	5	32	9,30	840	257,55
6	39	6,83	944	221,84	6	36	6,55	1006	102,72
7	43	3,87	1060	67,04	7	43	2,65	1180	53,62

Na figura 43 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, com o tempo de permanência em água para os compósitos com fibra de pinho e faia. Estes ensaios foram realizados considerando a mesma granulometria utilizada anteriormente diminuindo a pressão de processamento para 0,3 MN/m<sup>2</sup>.

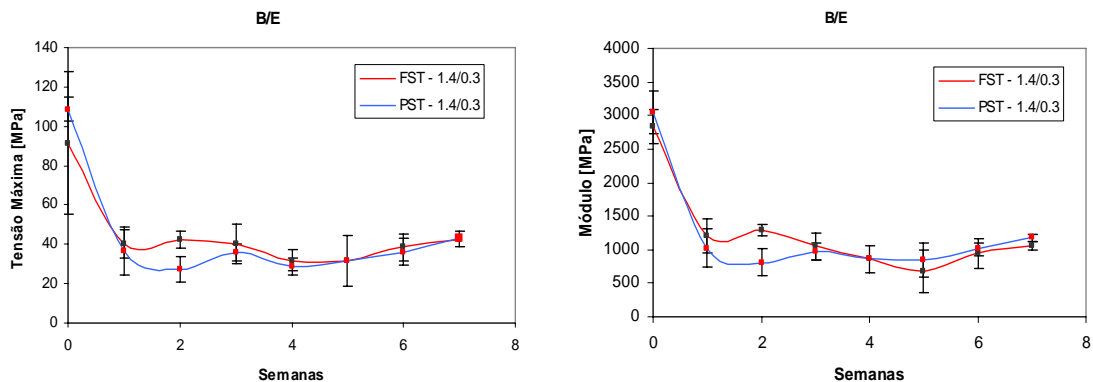


Figura 43. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras, com uma granulometria de 1.4 mm e pressão de fecho do molde de 0.3 MN/m<sup>2</sup>

Observa-se que tanto o módulo como a resistência mecânica, apresentam valores superiores aos verificados anteriormente para pressões de processamento de 0,6 MN/m<sup>2</sup>, para materiais não imersos em água. Este comportamento não era esperado, uma vez que ao diminuir a pressão de compactação esperava-se que as propriedades mecânicas diminuíssem relativamente ao caso anterior. É também possível observar uma degradação ligeiramente mais acentuada das propriedades mecânicas, quando imersos em água, relativamente ao materiais processados com uma pressão de 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

Na tabela 21 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas em termos de módulo de elasticidade e resistência mecânica em flexão em três pontos, para os dois tipos de fibra considerados. Estes ensaios foram realizados para uma granulometria de 1,0 mm e uma pressão de processamento de 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

Tabela 21. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de faia e pinho sem tratamento com uma granulometria de 1.0 e 0.6 MN/m<sup>2</sup> de pressão de compactação.

E / FST - 1.0 / 0.6		E / PST - 1.0 / 0.6			
C		F			
Semana	T. Máxima [MPa]	D.Padrão	Módulo [MPa]	D.Padrão	
0	101	9,64	2977	228,68	
1	30	0,73	810	19,80	
2	30	1,37	550	60,73	
3	43	1,83	1205	34,08	
4	27	2,50	549	33,54	
5	41	0,72	1118	62,62	



Semana	T. Máxima [MPa]	D.Padrão	Módulo [MPa]	D.Padrão
0	88	20,13	2624	251,60
1	53	4,61	1365	144,98
2	48	4,48	1342	99,28
3	47	4,88	1383	142,97
4	47	1,15	1454	130,09
5	51	1,97	1423	21,28
6	48	4,31	1317	270,02
7	50	4,70	1206	166,13

Na figura 44 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, com o tempo de permanência em água para os compósitos com fibra de pinho e faia. Estes ensaios foram realizados considerando uma granulometria de 1,0 mm e uma pressão de processamento de 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

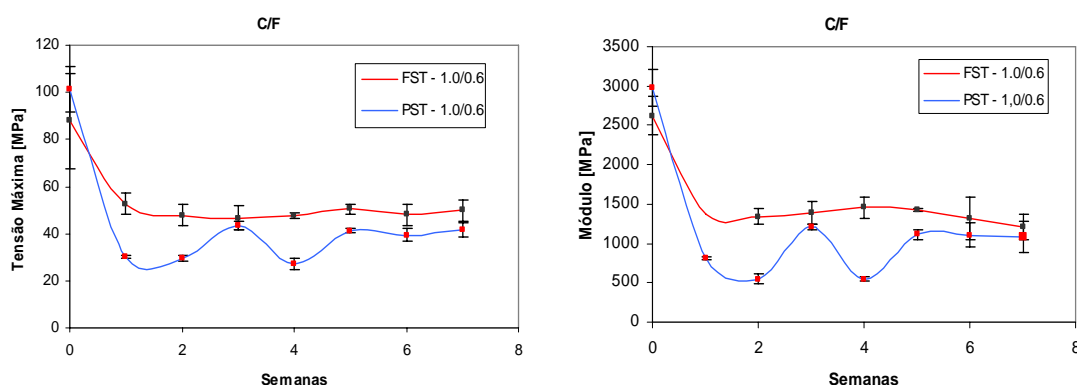


Figura 44. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras, com uma granulometria de 1.0 mm e pressão de fecho do molde de 0.6 MN/m<sup>2</sup>

Pode-se observar mais uma vez, que os compósitos com fibra de pinho apresentam valores superiores aos compósitos processados com fibra de faia no que diz respeito à sua resistência mecânica quando não imersos em água.

Na tabela 22 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas em termos de módulo de elasticidade e resistência mecânica à flexão em três pontos, para os dois tipos de fibra considerados neste

trabalho. Estes ensaios foram realizados para uma granulometria igual à anterior e uma pressão de processamento de 0,3 MN/m<sup>2</sup>.

Tabela 22. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de faia e pinho sem tratamento com uma granulometria de 1.0 e 0.3 MN/m<sup>2</sup> de pressão de processamento.

E / FST - 1.0 / 0.3					E / PST - 1.0 / 0.3				
J					I				
Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão	Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão
0	60	4,01	1952	288,16	0	63	13,57	1928	722,83
1	35	2,96	959	134,75	1	39	0,78	1072	54,40
2	37	3,23	1145	77,77	2	34	4,11	981	80,53
3	43	3,44	1198	126,76	3	33	6,17	977	162,66
4	33	5,79	973	158,02	4	25	10,96	727	333,26
5	37	14,27	1024	335,50	5	35	6,51	918	238,02
6	41	11,04	1069	228,05	6	29	10,01	885	271,92
7	29	9,72	879	256,90	7	32	7,92	853	275,60

Na figura 45 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica em função do tempo de permanência em água, para os materiais compósitos com fibra de pinho e faia. Estes ensaios foram realizados considerando uma granulometria de 1,0 mm e uma pressão de processamento de 0,3 MN/m<sup>2</sup>.

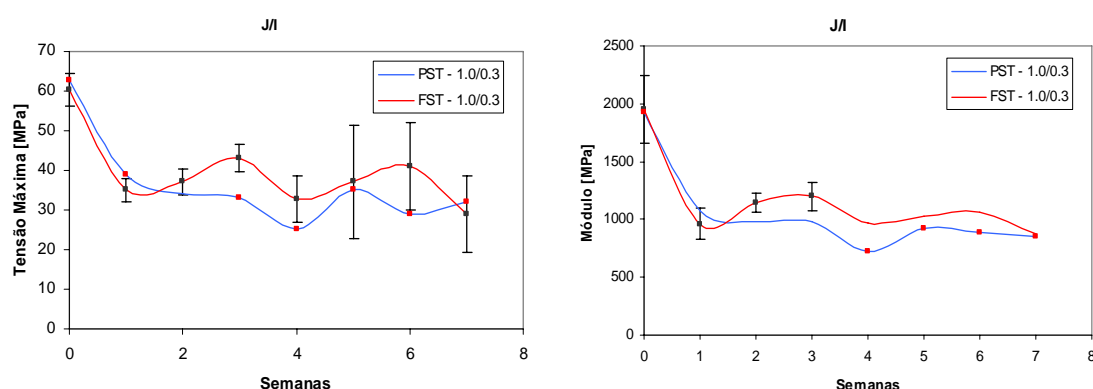


Figura 45. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras, com uma granulometria de 1.0 mm e pressão de fecho do molde de 0.3 MN/m<sup>2</sup>

Na análise das figuras 44 e 45 pode-se observar uma melhoria das propriedades mecânicas, módulo de elasticidade e resistência mecânica, como seria de esperar. Verifica-se que os compósitos com fibra de pinho e de faia mantêm o mesmo comportamento ou seja, os compósitos com fibra

de pinho apresentam propriedades mecânicas superiores quando não imersos em água, relativamente aos compósitos de faia. Esta situação inverte-se quando os compósitos são imersos em água, os compósitos de faia apresentam propriedades ligeiramente superiores aos de pinho. Mais uma vez verifica-se que a degradação das propriedades mecânicas destes materiais é acentuada durante a primeira semana de imersão em água. Este efeito poderia ter sido melhor analisado se os ensaios tivessem sido realizados ensaios com um periodicidade diária durante a primeira semana. Em todos os ensaios verificou-se uma pequena dispersão que pode ser explicada com problemas de homogeneidade das placas de material compósito.

Na tabela 23 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas em termos de módulo de elasticidade e resistência mecânica em flexão em três pontos, para os dois tipos de fibra considerados tratadas com solução de hidróxido de sódio 10%. Estes ensaios foram realizados para uma granulometria de 1,4 mm e uma pressão de processamento de 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

Tabela 23. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de faia e pinho com tratamento com uma granulometria de 1.4 e 0.6 MN/m<sup>2</sup> de pressão de processamento.

E / FNaOH - 1.4 / 0.6					E / PNaOH - 1.4 / 0.6				
O					K				
Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão	Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão
0	84	24,51	2346	311,01	0	81	21,70	2470	724,34
1	18	1,22	376	49,24	1	20	2,12	334	107,56
2	21	1,69	421	49,37	2	21	1,40	506	30,57
3	19	2,94	344	73,90	3	17	3,49	335	44,41

Na figura 46 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, com o tempo de permanência em água para os compósitos com fibra tratadas de pinho e faia. Estes ensaios foram realizados considerando uma granulometria de 1,4 mm e uma pressão de processamento de 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

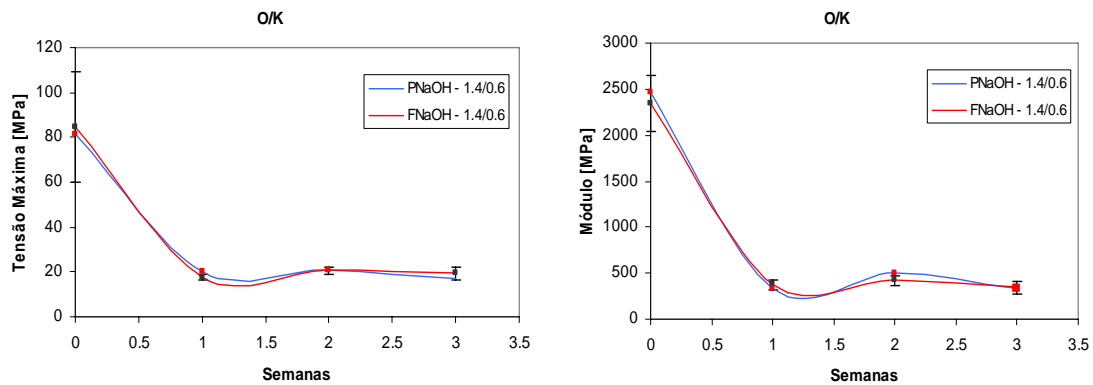


Figura 46. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras com tratamento, com uma granulometria de 1.4 mm e pressão de fecho do molde de 0.6 MN/m<sup>2</sup>

Pode-se observar que o tratamento teve um efeito negativo no que se refere às propriedades mecânicas, apresentando as duas curvas de evolução do módulo com o tempo de permanência em água o mesmo tipo de comportamento.

Na tabela 24 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas em termos de módulo de elasticidade e resistência mecânica à flexão em três pontos, para os dois tipos de fibra considerados neste trabalho, tratadas com uma solução de hidróxido de sódio 10%. Estes ensaios foram realizados para uma granulometria de 1,4 mm e uma pressão de processamento de 0,3 MN/m<sup>2</sup>.

Tabela 24. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de faia e pinho com tratamento com uma granulometria de 1.4 e 0.3 MN/m<sup>2</sup> de pressão de processamento.

E / FNaOH - 1.4 / 0.3					E / PNaOH - 1.4 / 0.3				
P					L				
Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão	Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão
0	96	5,94	2508	357,98	0	54	8,17	1559	211,19
1	15	1,70	232	27,29	1	20	0,50	338	25,03
					2	19	5,96	327	115,86
					3	21	1,93	409	99,57

2	18	1,18	329	19,04
3	18	2,73	415	36,76

Na figura 47 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, com o tempo de permanência em água para os compósitos com fibra tratadas de pinho e faia. Estes ensaios foram realizados considerando uma granulometria de 1,4 mm e uma pressão de processamento de 0,3 MN/m<sup>2</sup>.

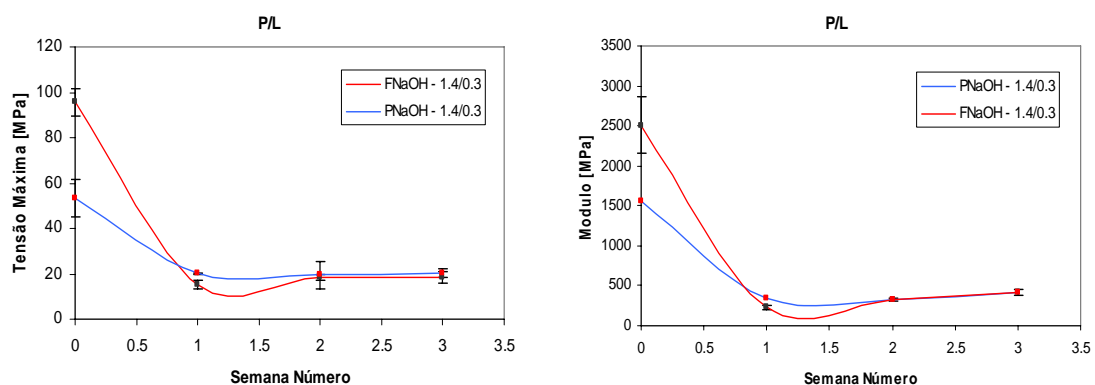


Figura 47. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras com tratamento, com uma granulometria de 1.4 mm e pressão de fecho do molde de 0.3 MN/m<sup>2</sup>

Pode-se observar na figura 47 uma melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos com fibra de faia, relativamente aos materiais com fibras de pinho.

Na tabela 25 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas em termos de módulo de elasticidade e resistência mecânica em flexão em três pontos, para os dois tipos de fibra, pinho e faia tratados com uma solução de hidróxido de sódio 10%. Estes ensaios foram realizados para uma granulometria de 1,0 mm e uma pressão de processamento de 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

Tabela 25. Resultados do ensaio de flexão para as fibras de faia e pinho com tratamento com uma granulometria de 1.0 e 0.6 MN/m<sup>2</sup> de pressão de processamento.

E / FNaOH - 1.0 / 0.6					E / PNaOH - 1.0 / 0.6				
					M				
Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão	Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão
0	99	3,91	2217	75,53	0	99	3,91	2217	75,53
1	10	1,05	140	11,39	1	10	1,05	140	11,39
2	12	0,66	182	11,29	2	12	0,66	182	11,29
3	5	1,03	107	22,27	3	5	1,03	107	22,27

Q				
Semana	T. Máxima [MPa]	D. Padrão	Módulo [MPa]	D. Padrão
0	109	17,33	2712	327,11
1	33	1,43	721	87,72
2	35	3,98	800	33,17
3	28	11,17	639	264,19

Na figura 48 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, com o tempo de permanência em água para os compósitos com fibra tratadas de pinho e faia. Estes ensaios foram realizados considerando uma granulometria de 1,0 mm e uma pressão de processamento de 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

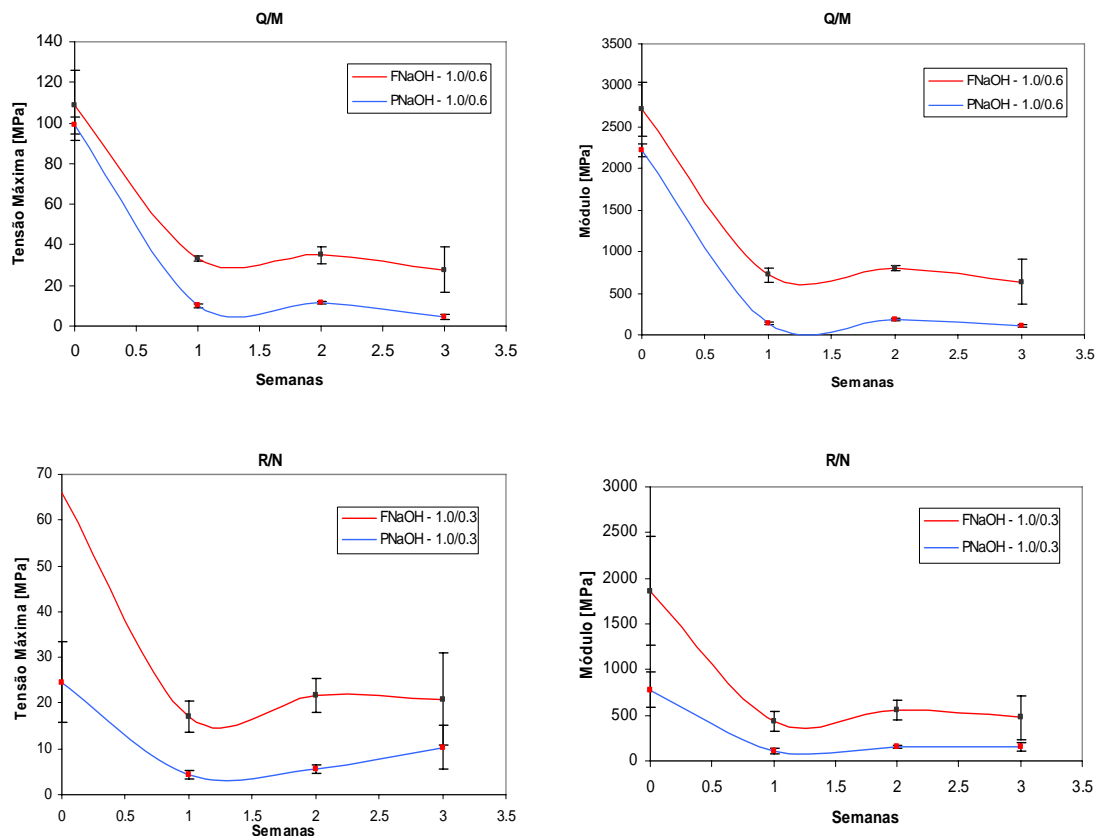


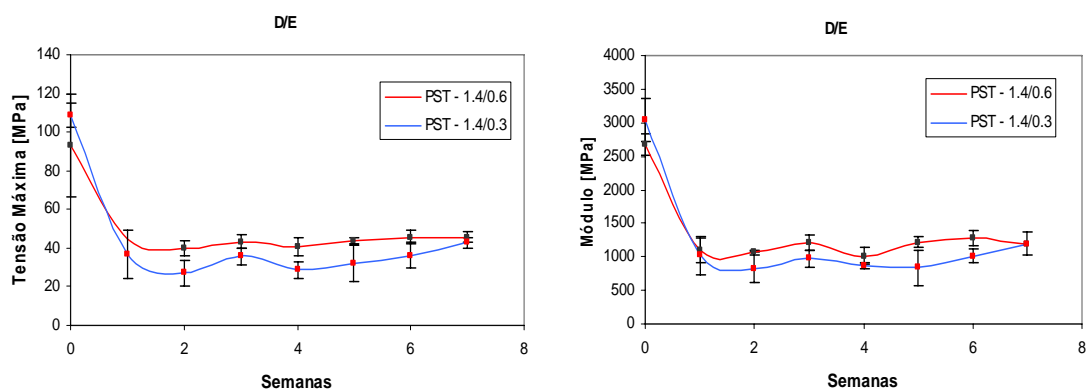
Figura 48. Gráficos da tensão máxima e do módulo para diferentes tipos de fibras com tratamento, com uma granulometria de 1.0 mm e pressão de fecho do molde de 0.6 MN/m<sup>2</sup>

Na análise das figuras observa-se que o tratamento teve um efeito mais negativo nas propriedades mecânicas do que o verificado anteriormente para uma granulometria de 1,4 mm. Observa-se que as propriedades do compósito com fibra de pinho são muito baixas, apresentando valores na ordem dos 10 MPa para a resistência mecânica e 150 MPa para o módulo de elasticidade.

#### 4.3.2 Influência da Pressão no Processamento de Materiais Compósitos com Fibra de Pinho e Faia

Na figura abaixo (gráficos 49, 50, 51 e 52) é analisado a influência da pressão no processamento de compósitos com fibra de pinho e faia.

Observa-se na figura 49 que com uma maior pressão de processamento os materiais compósitos processados com fibra de pinho apresentam uma menor degradação com o tempo de imersão em água. Para uma granulometria de 1,4 mm e não imersos em água não se verifica uma alteração das propriedades mecânicas. No caso de compósitos com uma granulometria de 1,0 mm, processados com uma pressão de compactação de 0,6 MN/m<sup>2</sup> apresentam valores superiores aos de 0,3 MN/m<sup>2</sup>.



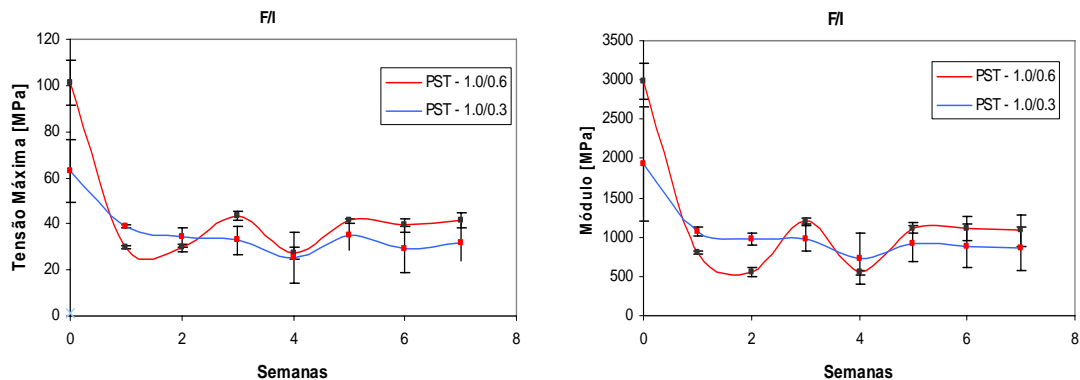
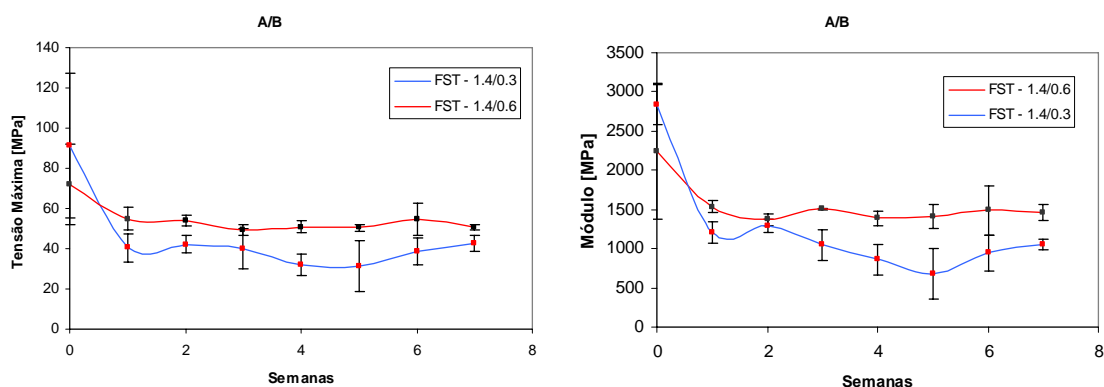


Figura 49. Gráficos da tensão máxima e do módulo para os provetes obtidos com fibra de pinho com diferentes pressões de processamento

Na figura 50 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, em função do tempo de permanência em água, para os materiais compósitos com fibra de faia não tratadas. Estes ensaios foram realizados considerando duas pressões de processamento, uma de 0,3 e 0,6 MN/m<sup>2</sup>.

Observa-se um comportamento similar ao observado com os compósitos com fibra de pinho. É possível observar, também, uma degradação mais acentuada para compósitos produzidos com pressões de processamento mais baixas.





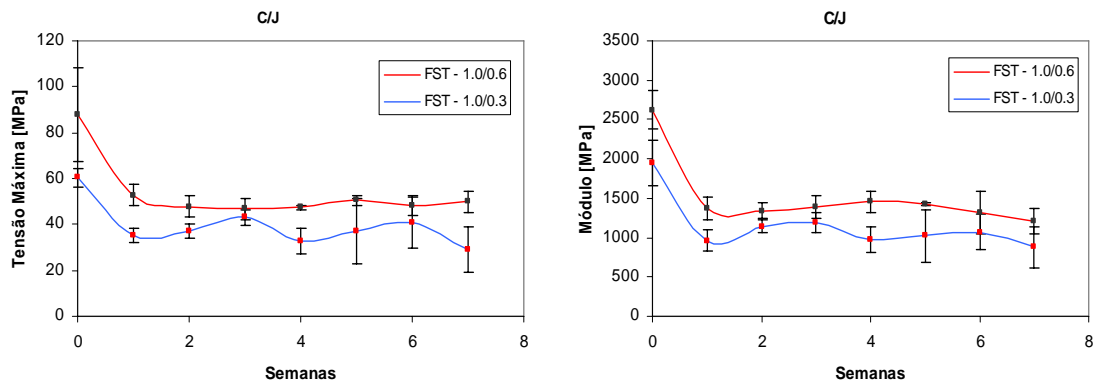
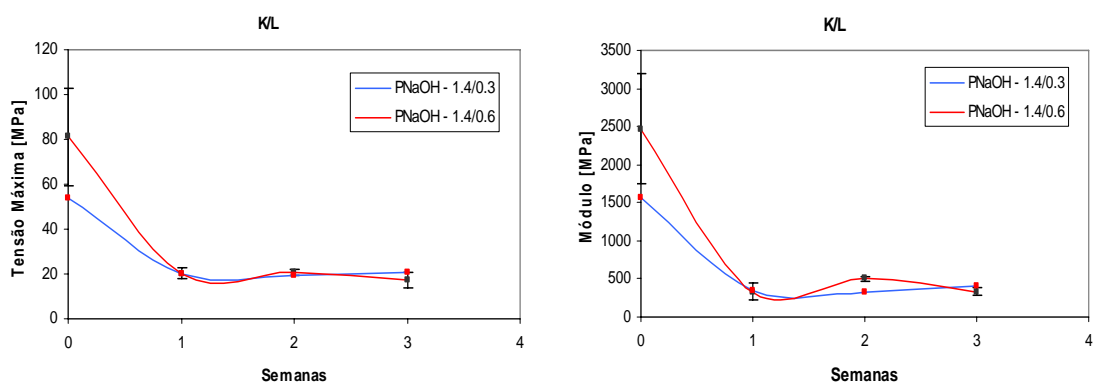


Figura 50. Gráficos da tensão máxima e do módulo para os provetes obtidos com fibra de faia com diferentes pressões de processamento

Na figura 51 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, em função do tempo de permanência em água para os materiais compósitos com fibras de pinho tratadas. Estes ensaios foram realizados considerando duas pressões de processamento, 0.3 e 0.6 MN/m<sup>2</sup>.

A partir da figura pode-se observar que os materiais processados com fibras de pinho tratadas com uma solução aquosa de NaOH 10 % não apresentam uma variação significativa das propriedades mecânicas e do módulo de elasticidade em função do tempo de permanência em água e para diferentes valores de pressão de processamento.



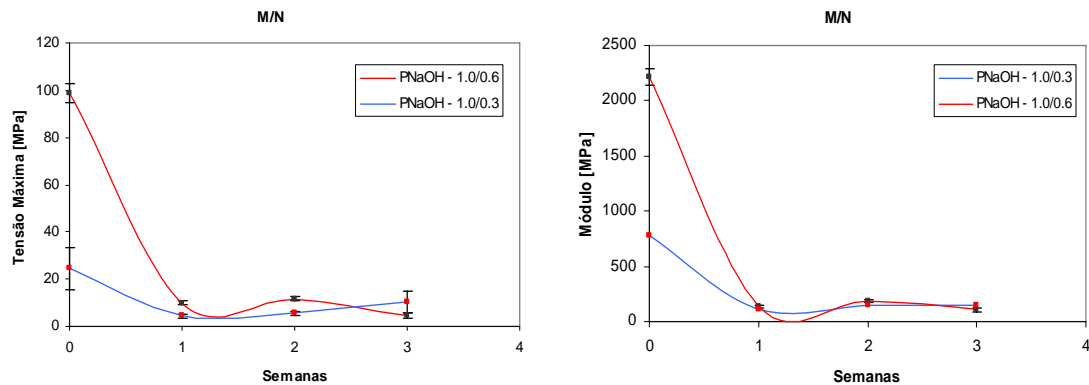
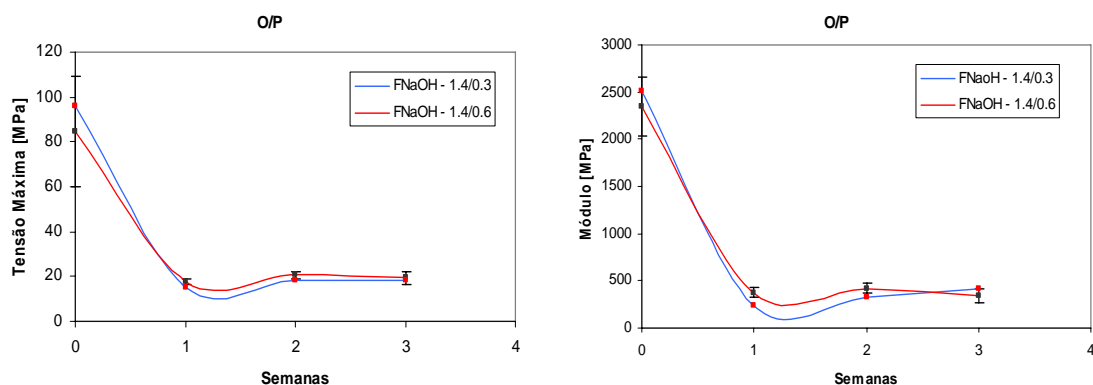


Figura 51. Gráficos da tensão máxima e do módulo para os provetes obtidos com fibras de pinho tratadas, com diferentes pressões de processamento

Verifica-se igualmente que para materiais não imersos em água, os materiais compósitos obtidos com fibra de pinho apresentam valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade superiores, para os valores de pressão de processamento mais elevados considerados neste trabalho.

Na figura 52 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, em função do tempo de permanência em água, para os materiais compósitos com fibra de faia tratadas. Estes ensaios foram realizados considerando duas pressões de processamento, uma de 0,3 e 0,6 MN/m<sup>2</sup>.



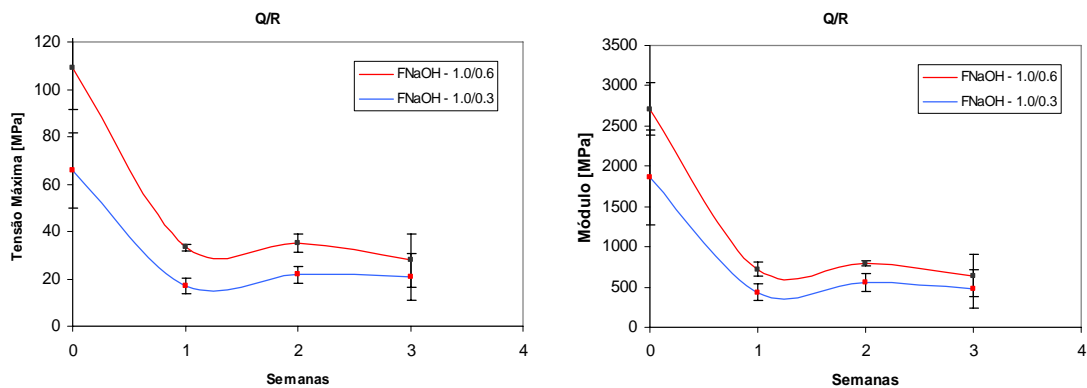


Figura 52. Gráficos da tensão máxima e do módulo para os provetes obtidos com fibra de faia tratada, com diferentes pressões de processamento

Na figura 52 pode-se observar que os materiais processados com pressões mais elevadas e que não estiveram em contacto com a água, apresentam valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade, mais elevados.

#### 4.3.3 Influência da Granulometria nas Propriedades Mecânicas dos Materiais Compósitos Processados com Fibras Naturais

Nas figuras 53, 54 e 55 é analisada a influência da granulometria na resistência mecânica e no módulo de elasticidade dos materiais processados com fibras de pinho e de faia.

Na figura 53 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, com o tempo de permanência em água para os compósitos com fibras de pinho não tratadas. Estes ensaios foram realizados considerando valores de granulometria de 1,0 e 1,4 mm.

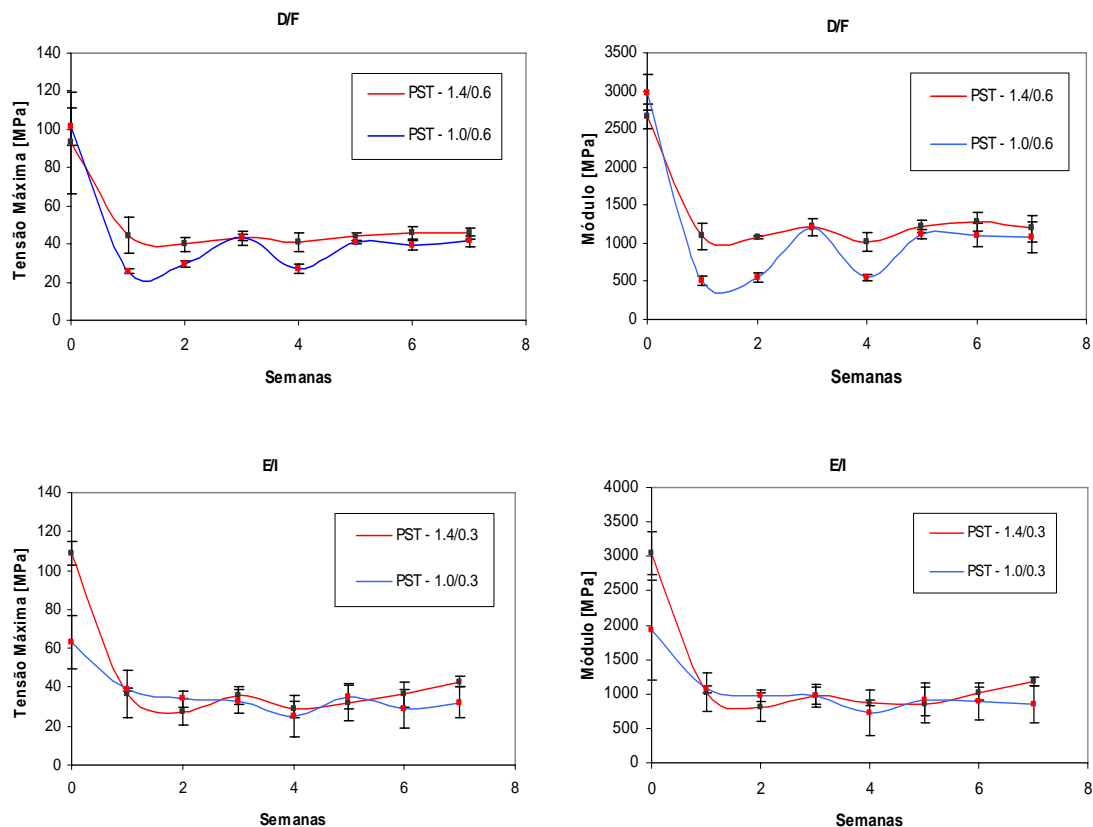


Figura 53. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de pinho com diferentes granulometrias

A partir da análise da figura 53 pode-se observar que não existem grandes variações de resistência mecânica e de módulo de elasticidade para os diferentes valores de granulometria considerados no processamento dos materiais compósitos, quer se utilizem fibras de pinho quer fibras de faia.

Na figura 54 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, em função do tempo de imersão em água para os compósitos com fibras de pinho tratadas. Estes ensaios foram realizados considerando valores de granulometria de 1,0 e 1,4 mm.

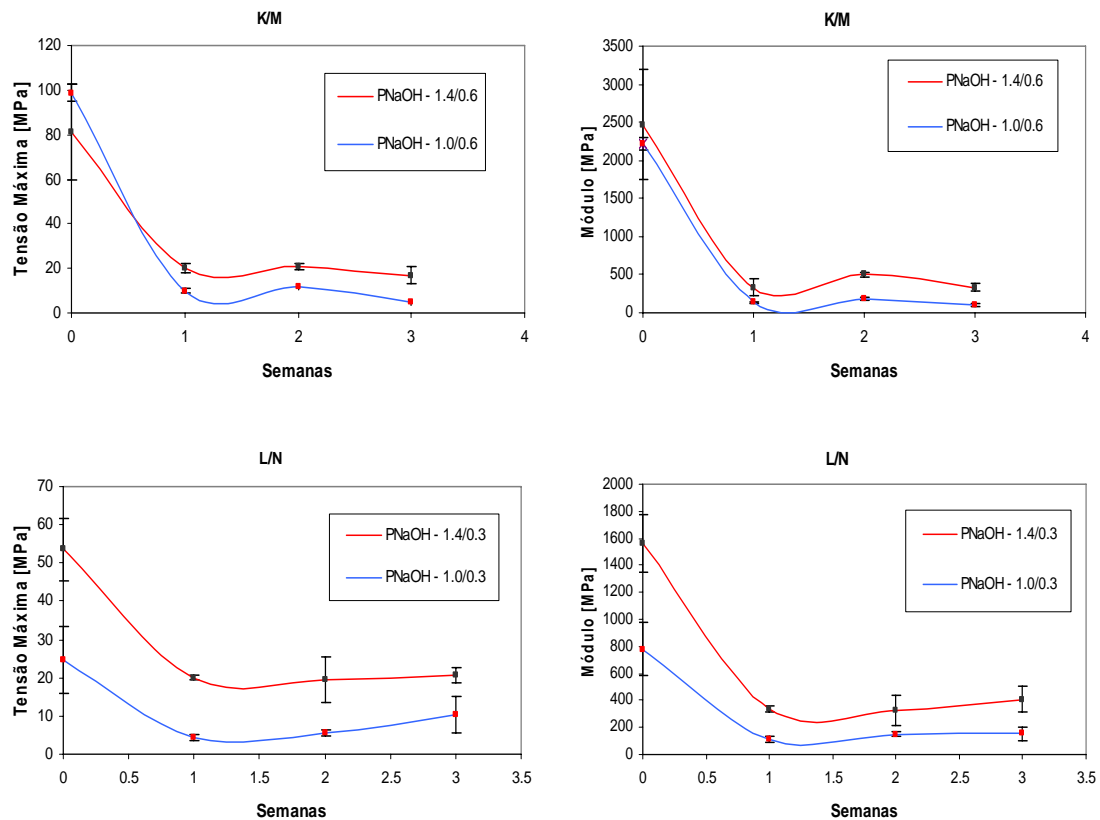


Figura 54. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de pinho tratada, com diferentes granulometrias

No que se refere aos materiais processados com fibras de pinho tratadas, pode-se observar a partir da figura 54 que os que utilizam fibras com uma granulometria de 1,4 mm, apresentam valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade superiores aos que foram processado com granulometria de 1,0 mm. Este facto é verificado quer para materiais que não forma imersos em água, quer para materiais imersos em água.

Na figura 55 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, em função do tempo de permanência em água, para os compósitos com fibras de faia tratadas. Estes ensaios foram realizados considerando valores de granulometria de 1,0 e 1,4 mm.

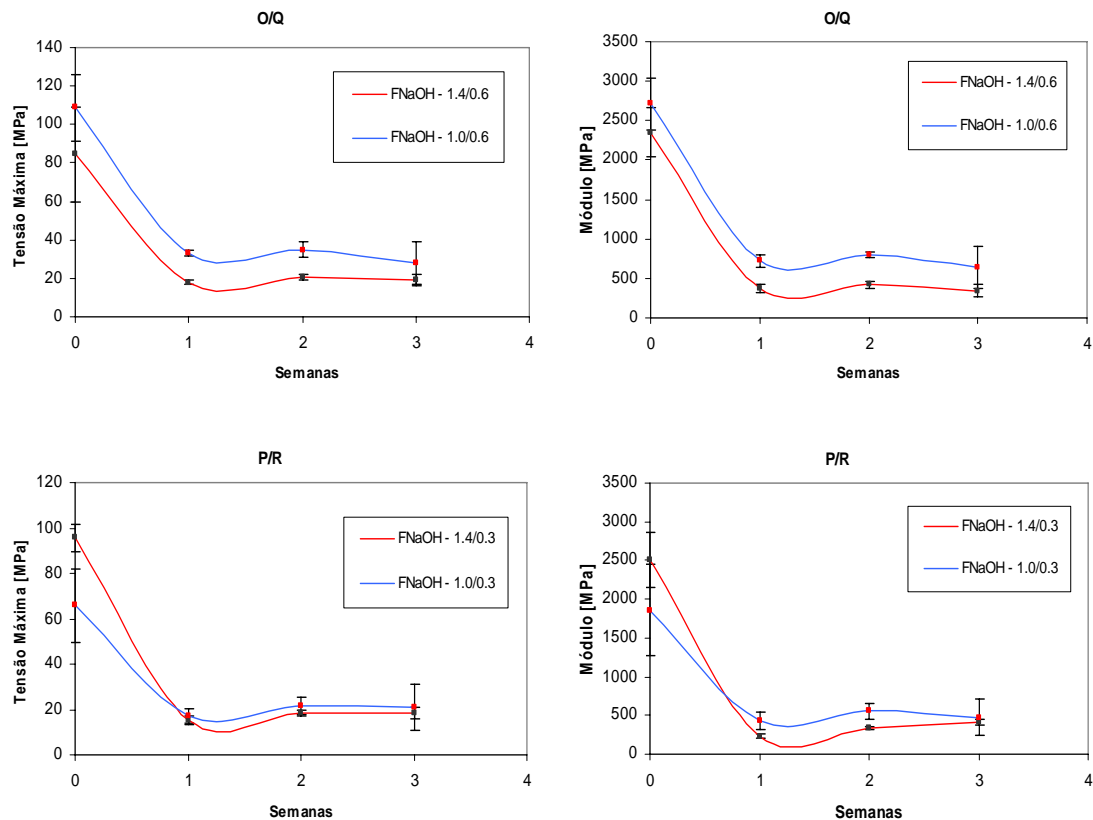


Figura 55. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de faia tratada, com diferentes granulometrias

Na figura 55 pode-se observar mais uma vez que os materiais processados com fibras tratadas com solução aquosa de NaOH 10%, apresentam melhores propriedades mecânicas para valores mais elevados de granulometria.

#### 4.3.4 Influência do Tipo de Tratamento nas Propriedades Mecânicas dos Materiais Compósitos Processados com Fibras Naturais

Nas figuras 56 e 57 são analisadas as influências do tratamento aplicado às fibras, na resistência mecânica e no módulo de elasticidade dos materiais processados com fibras de pinho e de faia.

Na figura 56 são apresentadas as curvas relativas à evolução do módulo de elasticidade e de resistência mecânica, com o tempo de permanência em água para os compósitos com fibra pinho, comparando a fibra tratada com a sem tratamento.

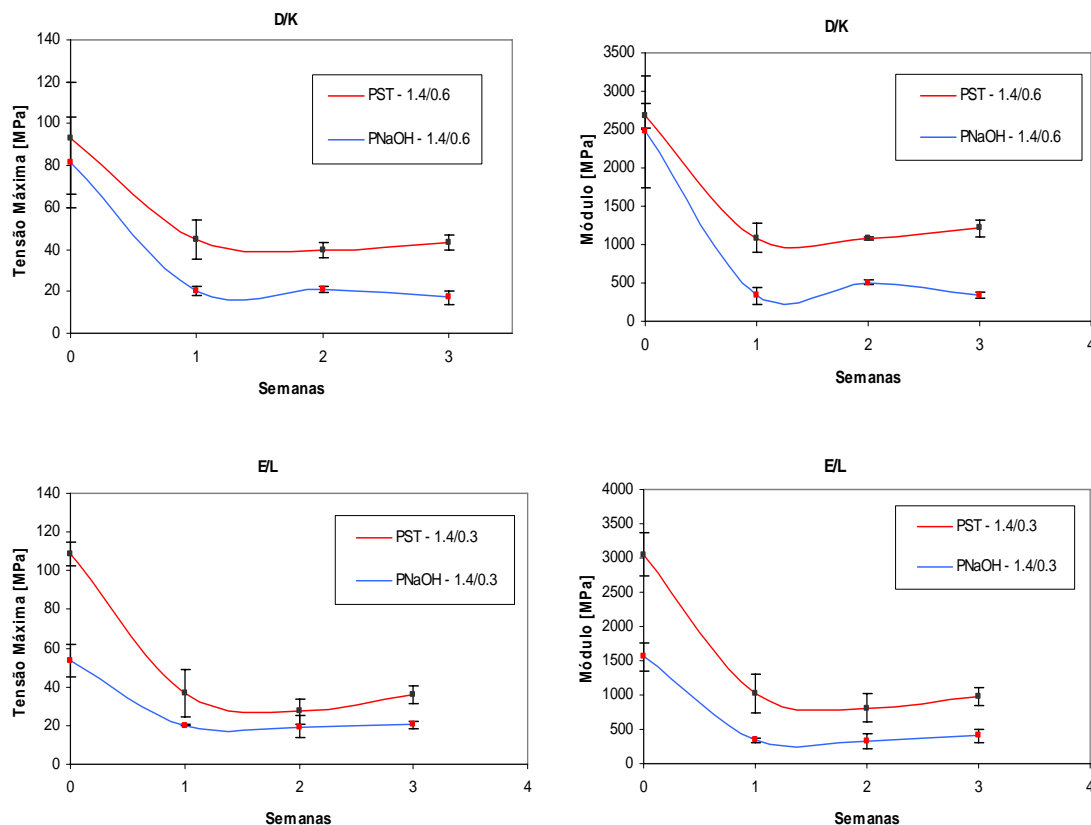


Figura 56. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de pinho com tratamento e sem tratamento

Observa-se que os materiais processados com fibras tratadas com uma solução aquosa de hidróxido de sódio 10%, apresentam propriedades mecânicas inferiores aos materiais processados com fibras não tratadas. Uma das possíveis causas, poderá ser explicada pelo facto de o tratamento ter degradado a estrutura molecular mais do que era previsto. O tratamento tem por objectivo a limpeza da superfície da fibra e a degradação da estrutura da lignina e hemicelulose de modo aumentar a superfície de contacto entre a fibra e a matriz. Ao analisar os valores obtidos pode-se concluir que o tratamento aplicado, danificou a estrutura

da lignina, hemicelulose e a estrutura de celulose da fibra, diminuindo assim a resistência mecânica da fibra.

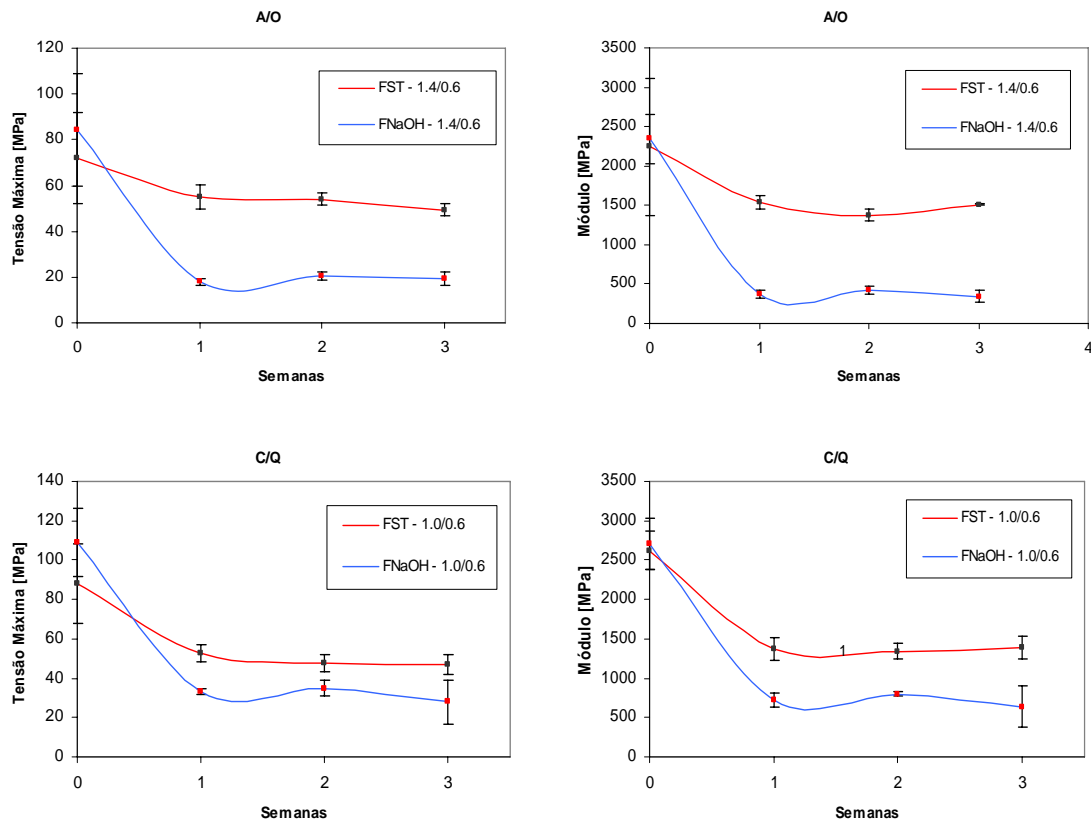


Figura 57. Gráficos de tensão máxima e de módulo para os provetes obtidos com fibra de faia com tratamento e sem tratamento

Na figura 57 pode-se observar o comportamento mecânico dos materiais compósitos com fibras de faia tratadas, para materiais que não estiveram imersos em água. Verificou-se que o tratamento influenciou as propriedades mecânicas dos compósitos. Relativamente aos materiais que foram imersos em água verifica-se uma degradação das propriedades mecânicas.

Na bibliografia analisada encontram-se conclusões semelhantes (Tita *et al*, 2002) para o comportamento mecânico dos materiais compósitos



com diferentes tipos de fibras e com diferentes concentrações de solução aquosa NaOH.

#### 4.4 Avaliação das Densidades dos Materiais Compósitos Processados com Fibras Naturais

É importante conhecer as propriedades dos materiais compósitos processados com fibras e estudar o efeito dos diversos parâmetros utilizados, tais como a utilização de diferentes tipos de fibras, diferentes pressões de processamento do molde, diferentes granulometrias e utilização de fibras com e sem tratamento e determinar a densidade destes materiais.

Tabela 26. Densidades dos compósitos obtidos com diferentes formulações

	M1	M2	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidade Corrigida [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>FST - 1.4/0.6</b>	0,4172	0,0511	1,1396	1,1374
<b>FST - 1.4/0.3</b>	0,4918	0,0045	1,0092	1,0073
<b>FST - 1.0/0.6</b>	0,8477	0,0547	1,0690	1,0669
<b>PST - 1.4/0.6</b>	0,4835	0,0493	1,1135	1,1114
<b>PST - 1.4/0.3</b>	0,5919	0,0568	1,1061	1,1040
<b>PST - 1.0/0.6</b>	0,6621	0,0808	1,1390	1,1368
<b>PST - 1.0/0.3</b>	0,7168	0,0981	1,1586	1,1564
<b>FST - 1.0/0.3</b>	0,6749	0,0184	1,0280	1,0261
<b>PNaOH - 1.4/0.6</b>	0,5964	0,0578	1,1073	1,1052
<b>PNaOH - 1.4/0.3</b>	0,9078	0,1233	1,1572	1,1550
<b>PNaOH - 1.0/0.6</b>	0,6662	0,0175	1,0270	1,0250
<b>PNaOH - 1.0/0.3</b>	0,5808	0,0556	1,1059	1,1038
<b>FNaOH - 1.4/0.6</b>	0,4843	0,0901	1,2286	1,2262
<b>FNaOH - 1.4/0.3</b>	0,7973	0,1166	1,1713	1,1691
<b>FNaOH - 1.0/0.6</b>	0,4809	0,0466	1,1073	1,1052
<b>FNaOH - 1.0/0.3</b>	0,5392	0,0523	1,1074	1,1053
Factor de correcção da água (T=20°C)			0,9981	

A partir da tabela 26 pode-se observar que para os materiais obtidos com pressões de processamento mais elevadas apresentam, naturalmente

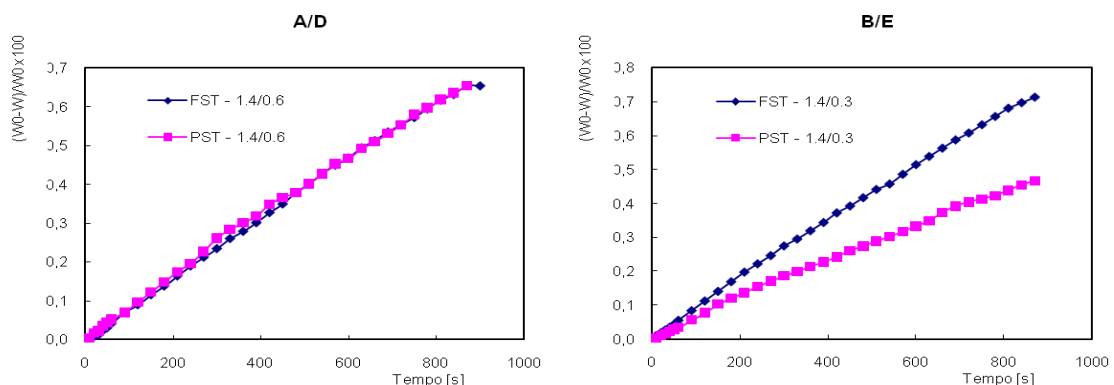
valores de densidade superiores aos obtidos com pressões mais baixas. Esse facto pode ser explicado devido ao facto de dos materiais processados com pressões maiores apresentarem uma estrutura mais homogênea e com um menor número de vazios.

#### 4.5 Ensaios de Absorção de Água dos Materiais Processados

Com estes ensaios pretende-se avaliar a absorção de água dos compósitos processados com dois tipos de fibra, diferentes pressões de processamento, diferentes granulometrias e também a influência do tratamento aplicado às fibras de pinho e faia.

##### 4.5.1 Influência da Absorção de Água nos Dois Tipos de Fibra Considerados no Processamento dos Compósitos

Na figura 58, pode-se observar as curvas de perda de água obtidas para as fibras de pinho e faia, para a mesma granulometria e mesma pressão de processamento.



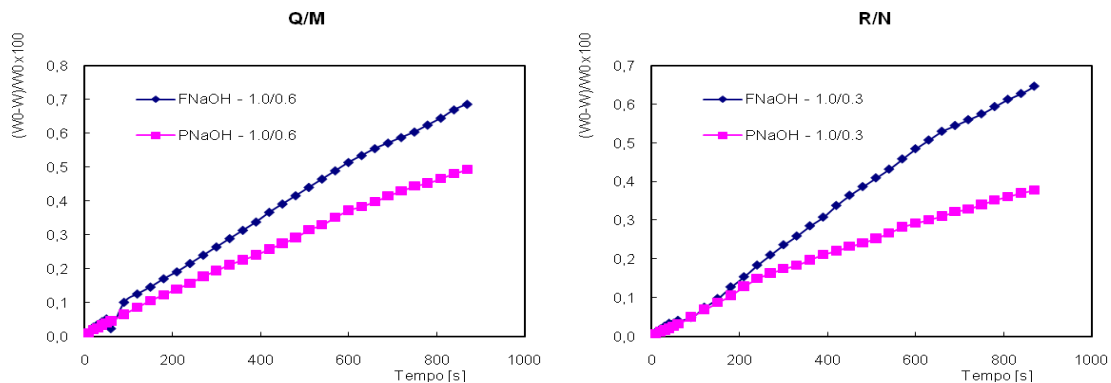
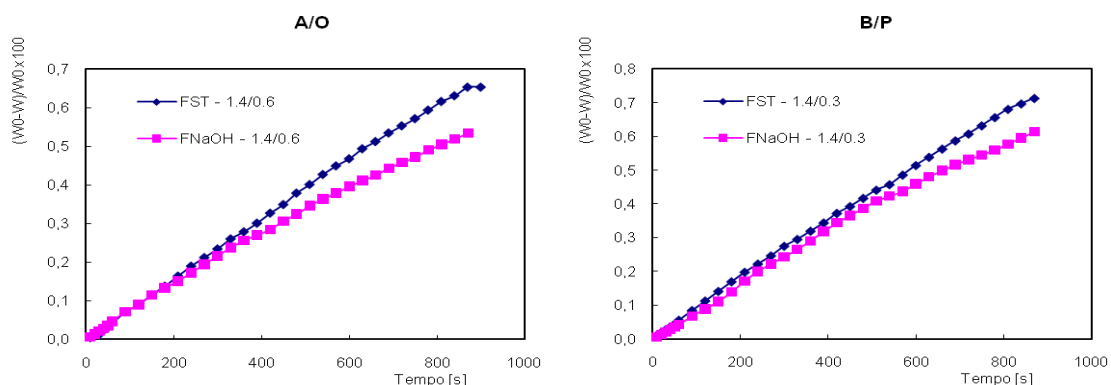


Figura 58. Gráficos de absorção de água para as fibras de faia e pinho

Na figura 58 verifica-se que os compósitos com fibra de pinho absorvem menos água que os compósitos processados com faia, para os dois valores de granulometria, pressão de processamento e tratamento considerado.

#### 4.5.2 Influência do Tipo de Tratamento na Absorção de Água no Processamento dos Compósitos

Na figura 59, são apresentadas as curvas de perda de água para os compósitos processados com pinho e faia, com e sem tratamento. Nestes ensaios foi considerados a mesma pressão de processamento e a mesma granulometria.



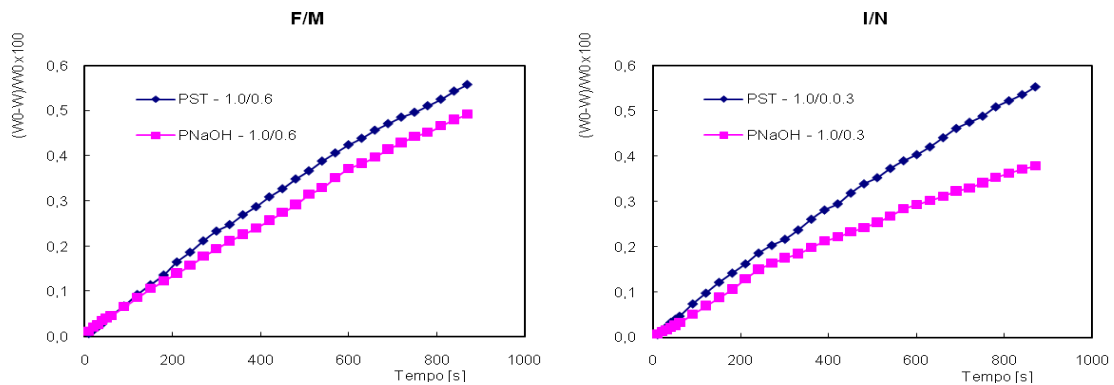


Figura 59. Gráficos de absorção de água para as fibras de faia e pinho com tratamento e sem tratamento

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam a mesma tendência que os referidos na literatura, independentemente da granulometria, tipo de fibra e pressão de processamento. Foi também observado, que os compósitos reforçados com fibras tratadas com NaOH 10% apresentam uma menor absorção de água relativamente aos que utilizam fibras sem tratamento (Tita *et al*, 2002).

As hemiceluloses tem um papel importante na absorção de água, embora a celulose não cristalina e a lignina também desempenhem um papel importante nesse processo (Tita *et al*, 2002).

Na análise dos resultados dos compósitos processados, observa-se que com o tratamento das fibras com solução NaOH 10%, verifica-se uma diminuição da quantidade de água absorvida, relativamente aos compósitos processados com fibras não tratadas.

Uma das justificações que podem ter contribuído para esta situação pode ter sido a extracção de hemicelulose, devido ao tratamento das fibras com a solução aquosa de NaOH 10%. Isto verifica-se pelo facto da hemicelulose ser considerada a principal responsável pela absorção de água, por ser mais vulnerável que as regiões cristalinas da celulose (Tita *et al*, 2002).

Outra justificação possível para a diminuição da quantidade de água absorvida pelo materiais processados pode residir no facto de o tratamento aplicado às fibras melhorar a adesão fibra/matriz. O tratamento com solução aquosa de hidróxido e sódio origina sítios adicionais de interações, uma vez que desagrega as fibras, promovendo uma maior interpenetração fibra/matriz na superfície. Para além disso contribui também para a redução da quantidade de micro cavidades presentes diminuindo assim a quantidade de agregados de moléculas de água que poderiam estar contidos nesses vazios (Tita *et al*, 2002).

## 5. Conclusões

Os materiais compósitos têm um campo de aplicação muito vasto. Uma otimização adequada dos parâmetros de processamento dos materiais compósitos permite obter materiais com um melhor desempenho.

Relativamente ao comportamento mecânico em flexão em três pontos, verifica-se um comportamento não muito eficaz para as fibras tratadas e para materiais não imersos em água, pois não há um aumento significativo no valor da resistência mecânica. No caso de materiais imersos em água verifica-se que a degradação é muito mais acentuada para materiais processados com fibras tratadas do que para os materiais processados com fibras sem tratamento.

Com recurso à análise da difracção de raio-X constata-se que o índice de cristalinidade das fibras tratadas com solução aquosa de hidróxido de sódio 10% é muito superior ao apresentado pelas fibras sem tratamento. Aparentemente o tratamento aplicado às fibras degradou a estrutura química da hemicelulose afectando também a estrutura amorfa da celulose, diminuindo assim as propriedades mecânicas das fibras e consequentemente dos compósitos. Essa degradação é mais evidente nas fibras de pinho.

Comparando o comportamento mecânico das fibras de pinho com as fibras de faia, tanto para as fibras tratadas como para as fibras não tratadas no caso de materiais imersos em água, verifica-se que os materiais compósitos com fibras de faia apresentam propriedades superiores às dos materiais compósitos com fibras de pinho. Este comportamento pode dever-se à maior percentagem de celulose apresentada pelos compósitos de fibra de faia em relação aos de fibra de pinho, uma vez que apresentam um índice de cristalinidade superior.

---

Relativamente aos ensaios de absorção de água, pode-se constatar que o tratamento das fibras foi eficiente uma vez que os materiais compósitos processados com fibras tratadas, com solução aquosa de NaOH 10%, apresentam uma menor absorção de água quando comparados com os obtidos com fibras não tratadas. O objectivo da utilização de fibras tratadas é o de aumentar a superfície de contacto fibra/matriz, e assim obter uma maior adesão das fibras à matriz polimérica. Este factor é conseguido através da remoção da estrutura de hemicelulose presente nas fibras. Esta maior adesão da matriz à fibra, associada à redução do carácter hidrofílico das fibras, permite um melhor desempenho dos compósitos obtidos com fibras tratadas em relação aos ensaios de absorção de água, sendo esta performance mais acentuada nos compósitos com fibras de pinho.

O tratamento revelou-se mais eficaz no caso do compósito com fibras de pinho uma vez que a fibra de pinho foi mais afectada sendo removida uma maior quantidade de hemicelulose do que no caso da fibra de faia. Este facto provoca uma menor absorção de água por parte dos materiais compósitos.

Pode-se verificar que o tratamento aplicado às fibras reduz a absorção de água e em alguns casos degrada as propriedades mecânicas dos materiais compósitos.

No que se refere à variação da granulometria das fibras de pinho e de faia utilizadas no processamento dos materiais compósitos, não se verificou nenhuma alteração significativa para materiais processados com fibras sem tratamento, em termos de propriedades mecânicas. Para materiais processados com fibras tratadas, observa-se que as propriedades mecânicas melhoram para valores mais elevados de granulometria.

Em relação ao trabalho futuro e uma vez que o estudo de materiais compósitos reforçados com fibras naturais está em largo desenvolvimento

---

a nível industrial, existe um conjunto de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos. No que se refere às fibras naturais, podem ser caracterizados quimicamente novos tipos de fibras que existem em grandes quantidades no território nacional, nomeadamente fibras de lã, linho, palha, etc. Diferentes tipos de tratamentos podem ser aplicados a estas fibras, e deste modo obter compósitos de fibras naturais que apresentem melhores propriedades mecânicas, térmicas e acústicas. Dos possíveis tratamentos a aplicar às fibras destacam-se o tratamento com ar ionizado e o tratamento com solução aquosa de hidróxido de cálcio ( $\text{CaOH}_2$ ). Para avaliar os efeitos deste último tratamento, pode ainda fazer-se variar a concentração das soluções aquosas, bem com a duração e a temperatura.

Para além dos tratamentos às fibras, deverão ainda realizar-se modificações e tratamentos ao nível da estrutura química da matriz. O principal objectivo é a introdução de um elemento químico (por exemplo, um polímero de origem natural) de modo a aumentar a afinidade química entre a fibra e a matriz.

No que se refere aos métodos de análise, podem ser utilizados diferentes métodos e obter algumas conclusões sobre os materiais processados. Relativamente à caracterização dos materiais processados e modificações na estrutura química das fibras, as técnicas de Microscopia Electrónica de Varredura (MEV), Espectrofotometria na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e Análise Termogravimétrica (DTA-TGA) permitem visualizar a adesão da fibra à matriz, a análise de degradação das fibras com a temperatura bem com a eficácia dos tratamentos utilizados.

Em relação à caracterização das propriedades mecânicas, podem ainda realizar-se ensaios de tracção, impacto, dureza, fadiga e resistência ao fogo.





## Referências Bibliográficas

Biagiotti, J.; Fiori, S.; Torre, L.; Lopez-Manchado, A. M.; Kenny, M. J., Mechanical properties of polypropylene matrix composites reinforced with natural fibers: A statistical approach, p. 26 – 36, *Polymer Composites*, Vol. 25, n.º 1, 2004.

Bogoeva-Gaceva, . G.; Dekanski, A.; Panic, V.; Poleti, D.; Grozdanov, A.; Buzarovska, A.; Avella, M.; Gentile, G. Natural fibers in polymer composite materials, *Seminar of the Serbian Chemical Society*, p. 89 – 92, 2006.

Caetano, L. F.; Graeff, A. G.; Garcez, E. O.; Bernardi, S. T.; Silva Filho, L. C. P., Compósito de matriz cimentícia reforçada com fibras, *Seminário de patologia das edificações*, Porto Alegre, 2004.

Clemons, C., Raw no materials for wood-polymer composites. *Wood-polymer composites*, editado por Kristina O. Niska e Mohini Sain, Cambrige, Woodhead, Reino Unido, 2008.

Clemons, C., Wood-Plastic composites in the United States: The interfacing of two industries, *Forest products Journal*, Vol. 52, n.º 6, p. 10-18, 2002.

Correa, C. A.; Fonseca, C. N. P.; Neves, S.; Razzino, A. C.; Hage Jr, E., *Compósitos termoplásticos com madeira*, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. 13, n.º 13, p. 154 – 165, 2003.

Debasish, D.; Basudam, A.; Debapriya, D., Grass fiber reinforced phenol formaldehyde resin composite: preparation, characterization and evaluation of properties of composite, *Polymers for advanced technologies*, Vol. 18, p. 72 – 81, Wiley, 2007.

Eleotério, J. R.; Filho, M. T.; Júnior, G. B, Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina, *Ciência Florestal*, Vol. 10, n.º 2, p. 75 – 90, 2000.

Fernandez, J., *Material Architecture: emergent materials for innovative buildings and ecological construction*, Architectural Press, 2005.

Foulger, A. N., *Classroom demonstrations of wood properties*, U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1969.

Fratzl, P., Characterizing natural fiber composites with hierarchical structure, *Fibre diffraction rev.*, Vol. 210, p. 31 – 39, 2002.

Hilling, E.; Freire, E.; Carvalho G. A.; Schneider V. E.; Pocai, K., Modeling of compositions based on wood-fiber using polyethylene and pinus sp. Sawdust, p. 343 – 351, *Ciência florestal* , Vol. 16, n.º 3, 2006.

Hull, D., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, 1982.

Iwakiri, S.; Del Menezzi, C. S.; Laroca, C.; Venson, I.; Matoski, S., Produção de compensados de pinus taeda e pinus oocarpa com resina fenol-formaldeído, *CERNE*, Vol. 8, n.º2, p.92-97, 2002.

Janarthanan, M.; Palanisamy, S.; Dinesh, U.; Pradeep, P.; Gowrishankar, C., *Mechanical properties of flax fibers and their composites* (www.fiber2fashion.com)

Joshi, V. S.; Drzal, L. T.; Mohanty, A. K.; Arora, S., Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites, *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, Vol. 35 p. 371 – 376, 2004.

Júnior, G. B.; Garcia, J. N., Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis OSB e compensados, *Árvore*, V. 28, n.º 4, p. 563 – 570, 2004.

Júnior, H. S.; Agopyan, V., Oliveira, L., Estudo da microestrutura das fibras vegetais e de suas implicações sobre o desempenho de compósitos cimentícios, *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, Vol. 17, n.º 1, p. 113 – 124, 1997.

Kim, S. W.; Lee, S. H.; Kang, J. S.; Kang, K. H., Thermal conductivity of the thermoplastic reinforced with natural fibers, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 27, n.º 6, p. 1873 – 1881, 2006.

Klock, U.; Muñiz, G. I. B.; Hernandez, J. A.; Andrade, A. S., *Química da Madeira*, 3.<sup>a</sup> Edição, Universidade Federal do Paraná, 2005.

Leão, A. L.; Rowell, R.; Tavares, N., Applications of natural fibers in automotive industry in brazil – thermoforming process. In *Science and Technology of Polymers and Advanced Materials*, P.N. Prasad *et al* (eds), Plenum Press, N. Y., p. 755 – 761, 1998.

Li, Y.; Mai, Y. W.; Ye, L.. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments, *Composites science and technology*, Elsevier, Vol. 60, p. 2037 – 2055, 2000.

Marinelli, A.L.; Monteiro, M.C.; Ambrósio, J.D.; Branciforti, M.C.; Kobayashi, M.; Nobre, A.D. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, nº 2, p. 92-99, 2008.

Martins, G. S.; Lozzi, M. A.; Martins, M. A.; Mattoso, L. H. C.; Ferreira, F. C. , Caracterização mecânica e térmica de compósitos de poli (cloreto de vinila) reforçados com fibra de sisal, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 14, p. 326 – 333, 2004.

Mateus, T. J., Bases para o dimensionamento de estruturas de madeira, *Memória n.º 179*, LNEC, Lisboa, 1961.

Mochnacz, S.; Amico, S. C.; Sydenstricker, T. H. D., Caracterização e modificação superficial de fibras de sisal para utilização em compósitos poliméricos, *Congresso em Ciências de Materiais do Mercosul*, 2002.

Moody, R. C.; Liu, J. Y., Glued structural members, *General Technical Report*, USDA Forest Service, USA, Chapter 11, 1999.

Mueller, D. H., Improving the impact strength of natural fibers reinforced composites by specifically designed material and process parameters, *INJ Winter*, p. 31 – 38, 2004.

Nasseh, J., Manual de construção de barcos, Booklook , 1ªed., 2000.

Newman, H. R.; Clauss, E. C.; Carpenter, J. E. P.; Thumm, A., Epoxy composites reinforced with deacetylated phormium kenaf leaf fibers, *Composites: Part A*, 38, p. 2164 – 2170, 2007.

Nicolai, F. N. P., Material compósito de matriz estervinilica reforçado com fibras naturais de sisal e coco e com fibra de vidro, a ser aplicado no design da engenharia naval, Dissertação de Mestrado, 2007.

Niska, K. and Sanadi, A., Interactions between wood and synthetic polymers. *Wood-polymer composites*, editado por Kristina O. Niska e Mohini Sain, Cambrige, Woodhead, Reino Unido, 2008.

Nordin, L., *Wood fiber composites: from processing and structure to mechanical performance*, PhD thesis, Lulea Technical University, 2004.

Norma ASTM D790M – Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials [Metric] – Standard Test

Methods - American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1983.

Norma ASTM D570 – 98, Standard Test Method for Water Absorption of Plastics - American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2005.

Paiva, J. M. F.; Trindade, W. G.; Frollini, E.; Compósitos de matriz termofixa fenólica reforçada com fibras vegetais, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, p. 170 – 176, 1999.

Pouzada, A. S.; Bernardo, C. A., Introdução à Engenharia de polímeros, *Área de Engenharia de Polímeros – Universidade do Minho*, 1983.

Razera. I. A. T., Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica, Tese de Doutorado, Universidade de São Carlos, 2006.

Riedle, U.; Nickel, J., Applications of natural fiber composites for constructive parts in aerospace, automobiles, and other areas; *Biopolymers*, Wiley, 2004.

Riedle, U, Natural fiber-reinforced biopolymers as construction materials, *2<sup>nd</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium*, Kassel, Alemanha, 1999.

Rowell, R. M., Property enhanced natural fiber composite materials based on chemical modification, In *Science and Technology of Polymers and Advanced Materials*, P.N. Prasad *et al* (eds), Plenum Press, N. Y., p. 717 – 732, 1998.

Santiago, B. H., Tratamento superficial da fibra do coco: estudo de caso baseado numa alternativa económica para fabricação de materiais compósitos, *Revista Analytica*, n.º26, p. 42 – 45, 2007.

Sarkar, S.; Adhikari, B., Jute felt composite from lignin modified phenolic resin, *Polymer Composites*, Vol. 22, n.º 4, p. 518 – 527, 2001.

Smith, W. F., Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, McGraw-Hill, 1998.

Tajvidi, M.; Falk, R. H.; Hermanson, J. C.; Felton, C., Influence of natural fibers on the phase transitions in high-density polyethylene composites using dynamic mechanical analysis, *Proceedings of the 7th International Conference on Woodfiber-Plastic Composites*, p. 187 – 195, 2003.

Teixeira, M. G.; César, S. F., Produção de compósito com resíduo de madeira no contexto da ecologia industrial, *Anais do 10º Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira*, São Pedro, 2006.

Tita, S. P. S.; Paiva, J. M. F.; Frollini, E., Resistência ao impacto e outras propriedades de compósitos lignocelulósicos: Matrizes termofixas fenólicas



reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. 12, n.º 4, p. 228 – 239, 2002.